

# **Zkratové výpočty ve střídavých sítích**

AC short-circuit calculations in electrical networks

**Dominik Voigt**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Jiří Gurecký

Ostrava, 2021

## **Abstrakt**

Tématem této bakalářské práce je rozbor zkratových jevů od vzniku zkratových jevů až po jejich následky a následný výpočet zkratových proudů na praktickém příkladu. V první části jsou popsány příčiny vzniku zkratu, druhy zkratu, průběhy zkratu a jejich následky. V dalších kapitolách je uveden postup výpočtu zkratových poměrů z normy ČSN EN 60909, výpočty parametrů prvků soustavy a výpočty počátečních rázových zkratových proudů pro různé fázové zkraty. Poslední část obsahuje příklad výpočtu zkratových poměrů, kde jsou parametry prvků počítány v poměrných a fyzikálních hodnotách.

## **Klíčová slova**

Zkrat, zkratový proud, zkratová impedance, ČSN EN 60909, druhy zkratu, příčiny zkratu.

## **Abstract**

The topic of this bachelor's thesis is the analysis of short-circuit phenomena from the occurrence of short-circuit phenomena to their consequences and the subsequent calculation of short-circuit currents on a practical example. The first part describes the causes of short circuits, types of short circuits, short circuits, and their consequences. In the following chapters, the procedure of calculation of short-circuit ratios from the standard ČSN EN 60909, calculations of parameters of system elements, and calculations of initial surge short-circuit currents for various phase short-circuits are presented. The last part contains an example of the calculation of short-circuit ratios, where the parameters of the elements are calculated in relative and physical values.

## **Key words**

Short-circuit, short-circuit current, short-circuit impedance, ČSN EN 60909, types of short-circuit, causes of short-circuit.

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Dr. Ing. Jiřímu Gureckému za odbornou pomoc, věcné připomínky a trpělivost při vytváření této bakalářské práce.

# Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk .....	7
Seznam obrázků .....	8
Seznam tabulek .....	9
1. Úvod .....	10
2. Teoretický rozbor zkratových jevů .....	11
2.1. Zkrat .....	11
2.2. Příčiny zkratu .....	12
2.3. Druhy Zkratu .....	13
2.3.1. Souměrné zkraty .....	13
2.3.2. Nesouměrné zkraty .....	14
2.3.3. Způsoby spojení částí s různými potenciály .....	15
2.4. Průběh zkratového proudu .....	16
2.4.1. Stejnosečná složka .....	16
2.4.2. Střídavá složka .....	16
2.4.3. Hodnoty pro dimenzování .....	17
2.5. Následky zkratového proudu .....	18
2.5.1. Dynamické účinky .....	18
2.5.2. Tepelné účinky .....	18
2.5.3. Obloukový zkrat .....	19
2.5.4. Pokles napětí .....	19
2.5.5. Přepětí .....	19
3. Metodika výpočtu zkratových poměrů dle EN 60909 .....	20
3.1. Předpoklady výpočtu .....	20
3.2. Metoda výpočtu .....	20
3.2.1. Použití souměrných složek .....	20
3.2.2. Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu .....	22
3.3. Minimální zkratové proudy .....	22
3.4. Maximální zkratové proudy .....	22
4. Parametry prvků soustavy .....	24
4.1. Impedance elektrického zařízení .....	24
4.2. Určení impedancí elektrického zařízení .....	24
4.2.1. Soustava .....	24
4.2.2. Alternátor .....	25

4.2.3.	Dvouvinuťové transformátory.....	26
4.2.4.	Trojvinuťové transformátory.....	27
4.2.5.	Reaktory .....	28
4.2.6.	Venkovní vedení .....	28
4.2.7.	Napájecí síť .....	29
5.	Výpočet zkratových proudů .....	31
5.1.	Počáteční souměrný rázový proud $I_k$ .....	31
5.1.1.	Jednofázový zkratový proud.....	31
5.1.2.	Dvoufázový zkratový proud.....	31
5.1.3.	Trojfázový zkratový proud.....	32
5.2.	Stejnosečná složka zkratového proudu.....	32
5.3.	Nárazový zkratový proud.....	32
5.4.	Ekvivalentní oteplovací proud .....	33
5.5.	Ustálený zkratový proud .....	33
5.6.	Souměrný vypínací zkratový proud .....	33
6.	Výpočet zkratových poměrů .....	35
6.1.	Výpočet počátečního zkratového proudu v bodě 1. ....	37
6.1.1.	Výpočet počátečního zkratového proudu v poměrných hodnotách.....	38
6.1.2.	Výpočet počátečního zkratového proudu v fyzikálních jednotkách.....	47
6.2.	Výpočet počátečního zkratového proudu v bodě 2. ....	61
6.2.1.	Výpočet počátečního zkratového proudu v poměrných hodnotách.....	61
6.2.2.	Výpočet počátečního zkratového proudu ve fyzikálních jednotkách.....	65
7.	Závěr .....	71
	<b>Seznam použité literatury:</b> .....	72
	<b>Seznam příloh</b> .....	73

## Seznam použitých symbolů a zkratk

$c$		Napěťový součinitel
$D$		Osová vzdálenost vodičů při souměrném vedení
$d$		Střední geometrická vzdálenost mezi vodiči jednoho svazku
$f$	(f)	Frekvence
$I$	(A)	Proud
$I_b$	(A)	Souměrný zkratový vypínací proud
$I_k$	(A)	Počáteční souměrný rázový proud
$I''_{k(1)}$	(A)	Počáteční rázový zkratový proud soustavy při jednofázovém zkratu
$I''_{k(2)}$	(A)	Počáteční rázový zkratový proud soustavy při dvoufázovém zkratu
$I''_{k(3)}$	(A)	Počáteční rázový zkratový proud soustavy při trojfázovém zkratu
$I_n$	(A)	Jmenovitý proud reaktoru
$I_V$	(A)	Vztažný proud
$I_{th}$	(A)	Ekvivalentní oteplovací proud
$i_p$	(A)	Nárazový zkratový proud
$i_{d.c}$	(A)	Stejnoseměrná složka zkratového proudu
$l$	(m)	Délka
$k$		Součinitel respektující zatížení stroje
$P$	(W)	Výkon
$P_{knT}$	(W)	Jmenovité ztráty nakrátko
$R$	( $\Omega$ )	Činný odpor
$R_k$	( $\Omega$ )	Činný odpor vedení na kilometr délky
$R_L$	( $\Omega$ )	Činný odpor vedení
$S$	(m <sup>2</sup> )	Průřez vodiče
$S_k$	(VA)	Zkratový výkon soustavy
$S_k$	(VA)	Souměrný počáteční zkratový výkon
$S_n$	(VA)	Jmenovitý výkon
$S_V$	(VA)	Vztažný výkon
$t$	(s)	Čas
$t_{min}$	(s)	Minimální doba vypnutí
$U$	(V)	Napětí
$U_n$	(V)	Jmenovité napětí
$U_{vyp}$	(V)	Výpočtové napětí
$u_k$	(%)	Napětí nakrátko
$X$	( $\Omega$ )	Reaktance
$X''_d$	( $\Omega$ )	Rázová reaktance
$X_k$	( $\Omega$ /km)	Reaktance vedení na kilometr délky
$Z$	( $\Omega$ )	Impedance
$Z_{(0)}$	( $\Omega$ )	Netočivá složka zkratové impedance
$Z_{(1)}$	( $\Omega$ )	Sousledná složka zkratové impedance
$Z_{(2)}$	( $\Omega$ )	Zpětná složka zkratové impedance
$\alpha$	(K <sup>-1</sup> )	Teplotní součinitel elektrického odporu
$\lambda$		Součinitel pro výpočet ustáleného zkratového proudu
$\rho$	( $\Omega$ mm <sup>2</sup> m <sup>-1</sup> )	Měrný odpor

## Seznam obrázků

Obr. 1 Úbytek napětí v obvodu při trojfázovém zkratu [1].....	11
Obr. 2 Trojfázový zkrat [1] .....	13
Obr. 3 Trojfázový zemní zkrat [1].....	13
Obr. 4 Dvoufázový zkrat [1] .....	14
Obr. 5 Dvoufázový zemní zkrat [1].....	14
Obr. 6 Jednofázový zkrat [1] .....	14
Obr. 7 Zemní spojení [1] .....	15
Obr. 8 Simultánní zkrat [1].....	15
Obr. 9 Průběh nesouměrného zkratového proudu [3].....	17
Obr. 10 Střídavá složka zkratového proudu [3].....	17
Obr. 11 Sousední složka zkratové impedance $Z(1)$ [2] .....	21
Obr. 12 Zpětná složka zkratové impedance $Z(2)$ [2].....	21
Obr. 13 Netočivá složka zkratové impedance $Z(0)$ [2] .....	21
Obr. 14 Praktický příklad .....	35
Obr. 15 Náhradní schéma zkratového obvodu pro sousledné složky v bodě 1. ....	37
Obr. 16 Náhradní schéma zkratového obvodu pro netočivé složky v bodě 1. ....	38
Obr. 17 Zjednodušené náhradní schéma .....	42
Obr. 18 Následné zjednodušené náhradní schéma .....	43
Obr. 19 Následné zjednodušené náhradní schéma .....	44
Obr. 20 Úplné zjednodušené náhradní schéma .....	44
Obr. 21 Náhradní schéma pro nulové složky .....	45
Obr. 22 Náhradní schéma zkratového obvodu .....	47
Obr. 23 Zjednodušené náhradní schéma zkratového obvodu.....	56
Obr. 24 Následné zjednodušené náhradní schéma zkratového obvodu.....	57
Obr. 25 Následné zjednodušené náhradní schéma zkratového obvodu.....	58
Obr. 26 Konečné náhradní schéma zkratového obvodu .....	58
Obr. 27 Náhradní schéma pro nulové složky .....	59
Obr. 28 Náhradní schéma pro sousledné složky v 2. bodě zkratu.....	61
Obr. 29 Zjednodušené náhradní schéma zkratového obvodu pro druhý výpočet zkratu.....	62
Obr. 30 Následné zjednodušené náhradní schéma pro druhý výpočet zkratu .....	63
Obr. 31 Konečné zjednodušené náhradní schéma.....	63
Obr. 32 Náhradní schéma zkratového obvodu ve fyzikálních veličinách .....	65
Obr. 33 Zjednodušené náhradní schéma .....	67
Obr. 34 Následné zjednodušené schéma zkratového obvodu.....	68
Obr. 35 Úplné náhradní schéma zkratového obvodu .....	68



## Seznam tabulek

Tab. 1 Napěťový součinitel $c$ .....	23
Tab. 2 Parametry transformátorů.....	36
Tab. 3 Parametry vedení.....	36
Tab. 4 Parametry asynchronních motorů.....	36
Tab. 5 Parametry reaktorů .....	36
Tab. 6 Parametry generátoru .....	37
Tab. 7 Hodnoty reaktancí pro transformátory .....	41
Tab. 8 Hodnoty reaktancí a odporů pro vedení .....	41
Tab. 9 Hodnoty reaktancí asynchronních motorů .....	42
Tab. 10 Hodnoty reaktancí reaktorů.....	42
Tab. 11 Hodnoty reaktancí generátoru a soustavy .....	42
<i>Tab. 12 Hodnoty sousledných impedancí pro transformátory .....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 13 Hodnoty sousledných impedancí pro vedení .....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 14 Hodnoty sousledných reaktancí pro asynchronní motor.....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 15 Hodnoty sousledných reaktancí pro reaktory .....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 16 Hodnoty sousledných reaktancí pro generátor a soustavu .....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 17 Hodnoty sousledných impedancí pro transformátory přepočtených na hladinu 110 kV .....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 18 Hodnoty sousledných impedancí pro vedení přepočtených na hladinu 110 kV .....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 19 Hodnoty sousledných reaktancí asynchronních motorů přepočtených na hladinu 110 kV.....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 20 Hodnoty sousledných reaktancí reaktorů přepočtených na hladinu 110 kV .....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 21 Hodnoty sousledných reaktancí generátoru a soustavě přepočtených na hladinu 110 kV .....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 22 Hodnoty sousledných impedancí pro vedení přepočtených na napěťovou hladinu 22 kV .....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 23 Hodnoty sousledných impedancí pro transformátory přepočtených na napěťovou hladinu 22 kV .....</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 24 Hodnoty sousledných reaktancí pro asynchronní motory přepočtených na hladinu 22 kV .....</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 25 Hodnoty sousledných reaktancí pro reaktory přepočtených na hladinu 22 kV.....</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 26 Hodnoty sousledných reaktancí pro generátor a soustavu přepočtené na hladinu 22 kV .....</i>	<i>66</i>
Tab. 27 Vypočtené hodnoty celkových impedancí zkratových obvodů.....	69
Tab. 28 Hodnoty počátečního zkratového proudu pro všechny body zkratu.....	70

## 1. Úvod

V každém elektrickém zařízení je potřeba počítat s různými poruchovými jevy, jako jsou přetížení, přepětí a zkrat. Přestože jsou zařízení elektrická zařízení projektována a sestrojena dle platných norem a předpisů s ohledem na spolehlivost zařízení, bezpečnost provozu a obsluhující osoby, tak není možné se vyhnout poruchovým jevům. Jednou z nejvýznamnějších a nejrozšířenějších poruch v elektrizační soustavě, především v elektroenergetice, je zkrat.

Zkrat je chybné vodivé spojení mezi fázemi nebo fází a země. Takto vznikají zkratové proudy a jejich nežádoucí účinky, které mohou ohrozit obsluhu nebo elektrická zařízení. Proto je nutné stanovit velikosti případných zkratových proudů a jejich nežádoucí účinky.

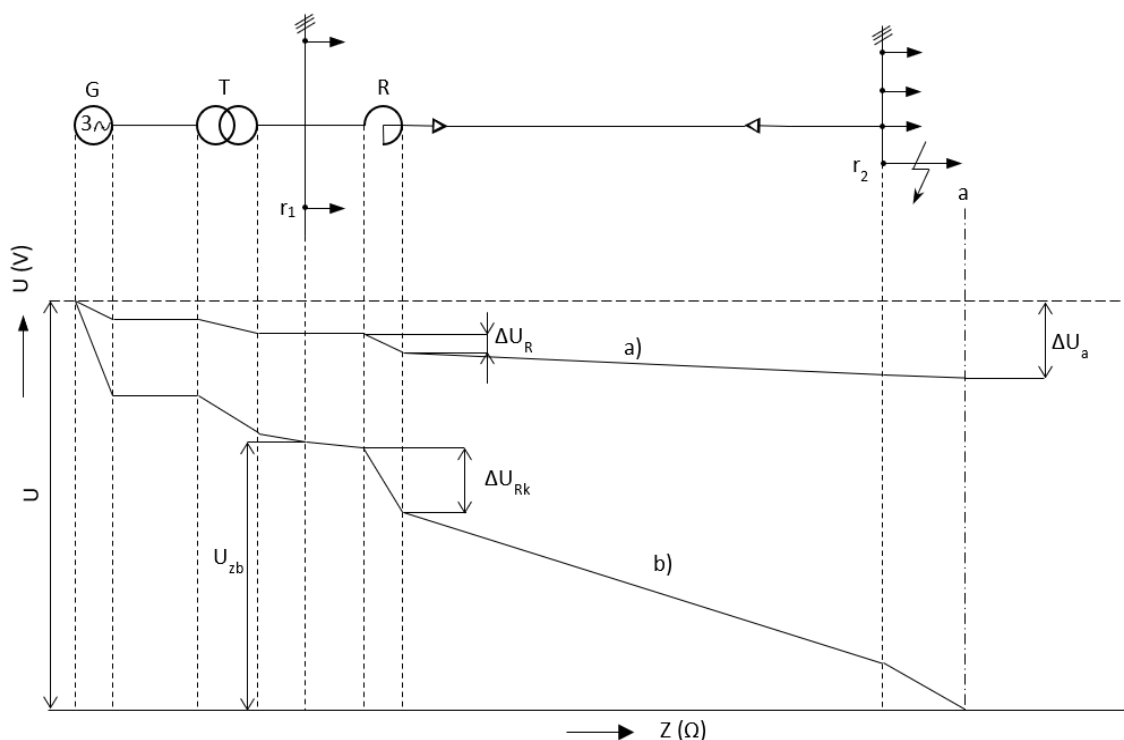
V této bakalářské práci jsou popsány zkratové jevy, příčiny vzniku zkratových jevů a jejich důsledky mezi které patří nadměrné přehřívání způsobené vysokými tepelnými ztrátami, mechanické namáhání, pokles napětí a další nežádoucí účinky, kterou mohou vést k úrazu nebo poškození elektrických zařízení. Následně se tato bakalářská práce zabývá metodikou výpočtu podle normy ČSN EN 60909. V poslední části se počítají zkratové poměry v praktickém příkladu, kde je cílem vypočítat počáteční rázové zkratové proudy v poměrných i fyzikálních hodnotách.

## 2. Teoretický rozbor zkratových jevů

### 2.1. Zkrat

Zkrat vznikne poruchovým spojením mezi jednotlivými fázemi elektrizační soustavy, nebo spojením fáze a země v uzemněné soustavě. Tyto poruchová spojení mají za následek zvětšení hodnoty proudu nad jeho obvyklou provozní hodnotu tím, že se v oblasti postižené zkratem se zmenšuje jeho celková impedance, která je tvořena vnitřní impedancí transformátorů a generátorů, z impedance přípojníc, venkovního vedení a kabelů. Tato změna impedance vede ke snížení napětí v místech, které jsou blízko zkratu. V místě zkratu se také vytváří přechodné odpory, které se vytváří také na spojích. Bez těchto impedancí a přechodným odporům by zkratovým obvodem, poté protékal nekonečně velký proud, podle Ohmova zákona. Kvůli dříve zmíněným impedancím a přechodným odporům, dosáhne zkratový proud konečné velikosti, která je tak velká, že ohrožuje obsluhující osoby a elektrická zařízení.

V místě zkratu klesne napětí na minimální velikost, kvůli tomu se vnitřní napětí zdroje spotřebuje na úbytky napětí v prvcích elektrického obvodu, jako jsou transformátory, alternátory, kabelové a venkovní vedení. Což zapříčiní pokles napětí v celém postiženém obvodu, který vzrůstá od zdroje až k místu zkratu. [1]



Obr. 1 Úbytek napětí v obvodu při trojfázovém zkratu [1]

a) při normálním zatížení b) při zkratu

$U_{zb}$  – zbytkové napětí;  $\Delta U_R$  – úbytek na reaktoru;  $\Delta U_{Rk}$  – úbytek na reaktoru při zkratu

## 2.2. Příčiny zkratu

Zkraty vznikají v elektrických zařízeních a v rozvodu spojených vodičů různých potenciálů. Ke vzniku zkratů může dojít z několika příčin:

- a) Vadami a nedokonalosti
- b) Přepětím
- c) Chybnou manipulací
- d) Nedostatečnou zkratovou odolností a vzdušnou vzdáleností
- e) Poškozením cizími zásahy
- f) Cizími vodivými částmi na holých spojích

### a) Vznik vadami a nedokonalosti

Vznik zkratu vadou nebo nedokonalostí bývá především způsoben špatnou izolací kabelů nebo přístrojů, vadnými kontakty a poškozením izolátorů. K těmto vadám dochází během provozu nebo jsou zaviněny špatnou výrobou. Velký počet zkratů bývá způsoben nedbalou montáží elektrických zařízení. Časté proudové přetížení způsobuje předčasné stárnutí izolace vodičů, poškození spojů nebo opálení kontaktů. Vady izolace se při jmenovitých hodnotách neprojevují. K poruchám dochází při přepětí nebo při delší době provozu zařízení u spojů k nadměrnému přehřívání, uvolňování a přetavování z důvodu proudového zatížení.

### b) Přepětím

Přepětí způsobuje zkraty v elektrických zařízeních s nedostatečnou izolací, v prostorách se ztíženými klimatickými podmínkami, jako jsou vysoká kondenzace páry při snižování teploty nebo nadmořská výška přes 1 000 m. Přepětí lze rozdělit na vnitřní nebo vnější. Vnitřní přepětí vznikají při náhlé ztrátě zatížení, při nesouměrných stavech, při poruchových stavech a při určitých spínacích pochodech. Vnější přepětí vznikají ve venkovních vedeních při úderu blesku do vedení nebo při výbojích mimo vedení. Při přímém úderu bleskem může bouřkové přepětí, trvající pár desítek  $\mu$ s, dosahovat velkých hodnot, které izolace nemůže zvládnout.

### c) Chybnou manipulací

Chybná manipulace se nejčastěji projevuje u odpojovačů, kterými lze vypínat jen malé proudy, proto pokud vypneme proudy větší, vznikne mezi kontakty oblouk, a poté dochází ke vzniku trojfázového zkratu. Takto vznikají úrazy obsluhujících osob.

### d) Nedostatečnou zkratovou odolností a vzdušnou vzdáleností

Pokud není zařízení dostatečně dimenzováno s ohledem na silové a tepelné účinky zkratových proudů, může dojít k poškození elektrického zařízení a ke vzniku dalšího zkratu na jiném místě. Nadměrné silové účinky zkratového proudu mohou způsobit popraskání a utržení izolátoru. Vysoké tepelné účinky zkratového proudu mohou zapříčinit předčasné stárnutí izolace nebo v horších případech i požár.

### e) Poškození cizími zásahy

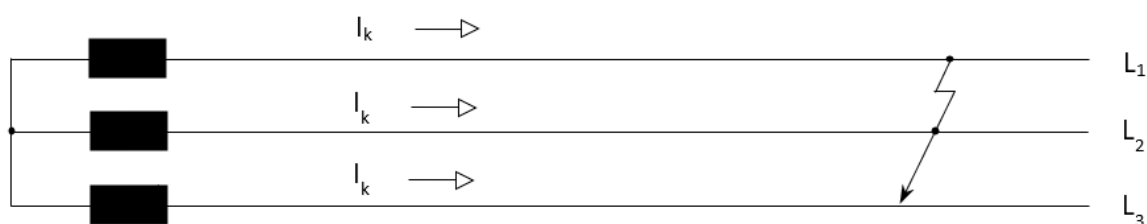
Poškození cizími zásahy se nejčastěji projevuje u kabelových rozvodů při stavebních pracích nebo činnostech jako jsou výkopy, různé úpravy terénů nebo vozovek. Při těchto pracích se kabely poškozuji bagry, buldozery a dalšími těžkými vozidly. Také hlodavci mohou poškodit izolaci v kabelových kanálech. Časté jsou i poškození venkovních vedení, které jsou způsobeny lidmi a nebo častěji přírodními vlivy. Tyto poškození bývají způsobeny ptactvem, pádem stromů a větví.

## 2.3. Druhy Zkratu

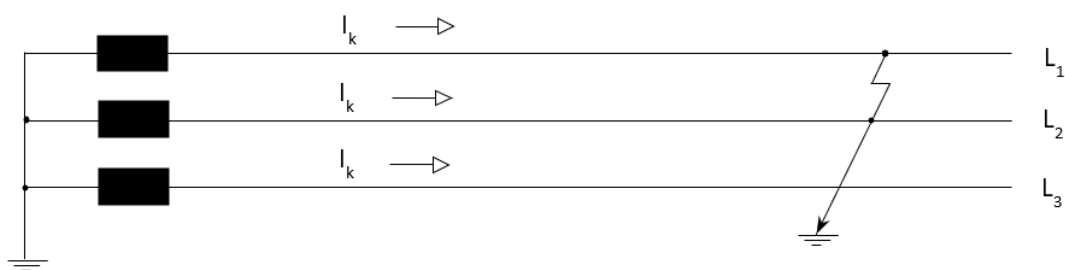
Zkraty lze dělit na souměrné a nesouměrné.

### 2.3.1. Souměrné zkraty

Souměrný nebo trojfázový zkrat vznikne spojením všech tří fází soustavy. Vodiči teče stejný zkratový proud a jsou totožně postiženy. Trojfázový zkrat nejčastěji vzniká v kabelových sítích. Při zkratu vzniká elektrický oblouk, který díky své vysoké teplotě poruší izolaci mezi všemi fázemi. Souměrný zkrat často vede k nejvyšším hodnotám zkratového proudu. Existují dva typy trojfázového zkratu trojfázový zemní zkrat a trojfázový zkrat.



Obr. 2 Trojfázový zkrat [1]



Obr. 3 Trojfázový zemní zkrat [1]

### 2.3.2. Nesouměrné zkrat

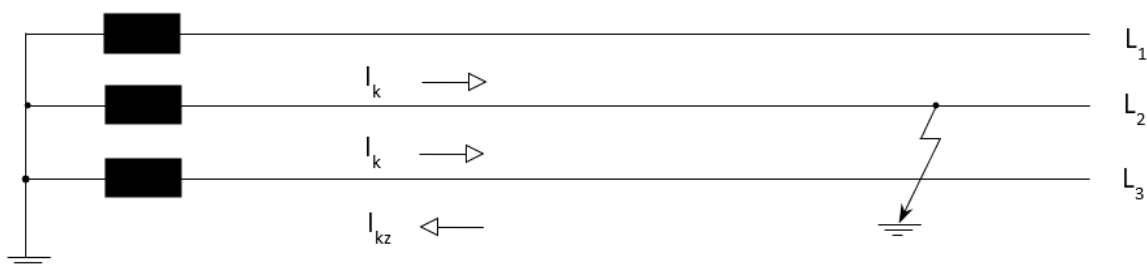
Zkratky nesouměrné nepůsobí na všechny 3 fáze totožné poškození a neteče jimi stejný zkratový proud. Do nesouměrných zkratů řadíme dvoufázový zemní zkrat, dvoufázový zkrat, jednofázový zkrat, zemní spojení a simultánní zkrat.

Dvoufázový zkrat nastane při jakémkoli spojení dvou fází.



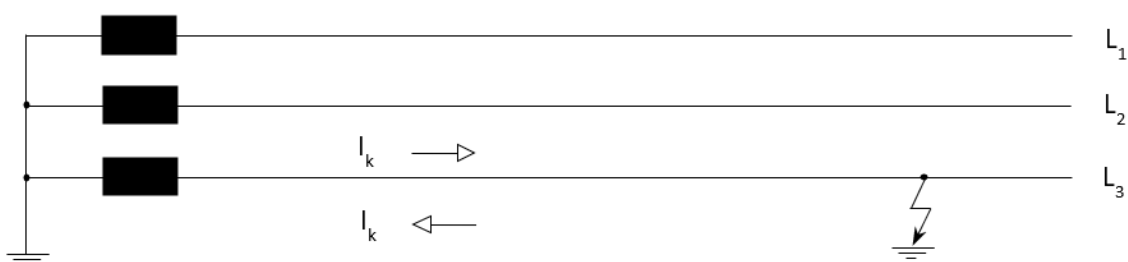
Obr. 4 Dvoufázový zkrat [1]

Dvoufázový zemní zkrat nastane při spojení dvou fází současně se zemí.



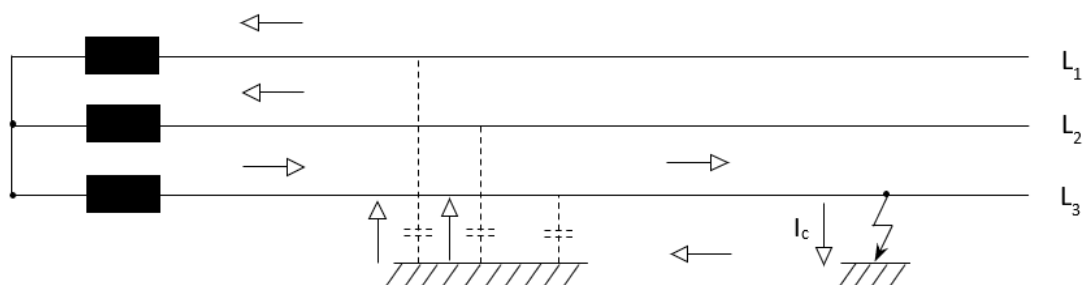
Obr. 5 Dvoufázový zemní zkrat [1]

Jednofázový zkrat nastane při spojení jedné fáze se zemí a nebo se středním vodičem.



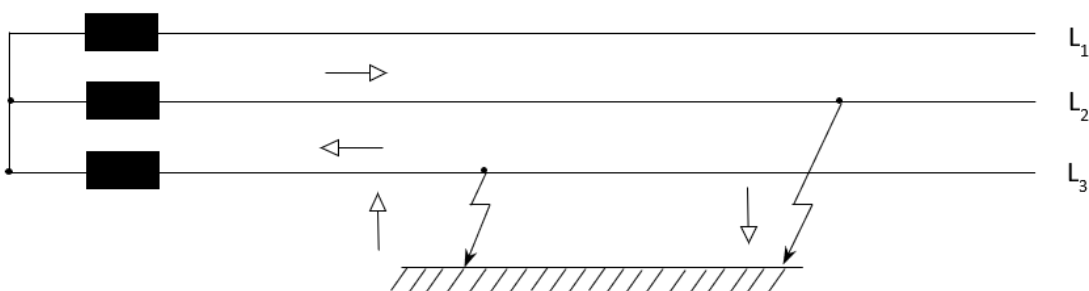
Obr. 6 Jednofázový zkrat [1]

Zemní spojení nastává v soustavě s izolovaným nulovým bodem, když se spojí jedna fáze se zemí a nepovažuje se za zkrat.



Obr. 7 Zemní spojení [1]

Simultánní zkrat je zvláštní případ dvoufázového zkratu, vzniklý spojením různých dvou fází se zemí, ale na dvou různých místech.



Obr. 8 Simultánní zkrat [1]

### 2.3.3. Způsoby spojení částí s různými potenciály

Souměrné a nesouměrné zkraty lze nadále rozdělit podle velikosti přechodných odporů závisících podle způsobu spojení fází na dokonalé zkraty, nedokonalé zkraty a obloukové zkraty.

#### Dokonalý zkrat

Impedance v místě zkratu je zanedbatelná a vzniká dokonalým spojením. Nejčastěji je způsobena kovovým spojením.

#### Nedokonalý zkrat

Impedance spojení má vliv na velikost zkratového proudu a nelze ji zanedbat. Nejčastěji ji způsobuje větev stromu o určitém odporu.

#### Obloukový zkrat

Vzniká spojením a nebo přiblížením vodičů na přeskokovou vzdálenost. Toto přiblížení vodičů způsobuje snížení izolační pevnosti a dovozuje vzniku elektrického oblouku. V průběhu zkratu se proud i délka oblouku neustále mění a s tím i jeho odpor.

## 2.4. Průběh zkratového proudu

Při vzniku zkratu v elektrizační soustavě, bez ohledu na to, co ho způsobilo, dojde v elektrizační soustavě k přechodu z normálního stavu do stavu poruchového. V tomto přechodu se začíná odehrávat významné změny elektrického stavu, které zde trvají po určitou dobu. Proud se při zkratu nemění pouze podle periodické funkce, ale jeho změnu zprostředkovává i vyrovnávací proud. Zkratový proud se tudíž musí skládat ze dvou hlavních složek: ze stejnosměrné složky, která s rostoucím časem klesá až úplně zanikne, a ze střídavé složky, která začíná s vysokou amplitudou a s rostoucím časem se amplituda postupně zmenšuje. [4]

### 2.4.1. Stejnosměrná složka

Stejnosměrná složka  $i_{DC}$  na počátku zkratu dosahuje různých velikostí, záleží zde, v jakém okamžiku dojde ke zkratu. Zkratový proud bývá převážně indukčního charakteru, to znamená, že proud je za napětím opožděn přibližně o  $90^\circ$ . Podle tohoto poznatku můžeme tvrdit, že maximální hodnota stejnosměrné složky vznikne v okamžiku zkratu, kdy je napětí nejmenší.

Při výpočtu zkratů musíme vždy uvažovat s nejméně příznivějšími podmínkami, proto se bude uvažovat s maximální stejnosměrnou složkou. Zkratový proud se stejnosměrnou složkou nazýváme zkratovým proudem nesouměrným [1]

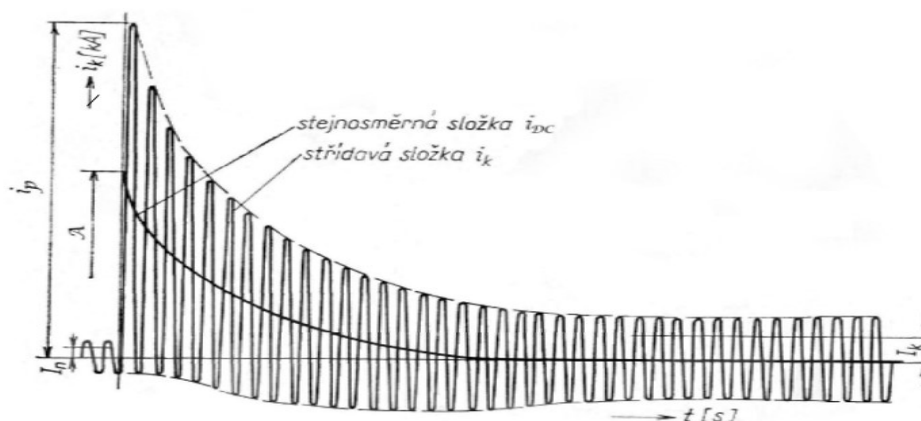
### 2.4.2. Střídavá složka

Střídavá složka je souměrná podle časové osy a frekvence této složky je určena podle frekvence zdroje. Totožný průběh se objevuje i u zkratového proudu ve fázi, kde nevznikla stejnosměrná složka. Stejnosměrná složka je obecně tvořena ze tří složek:

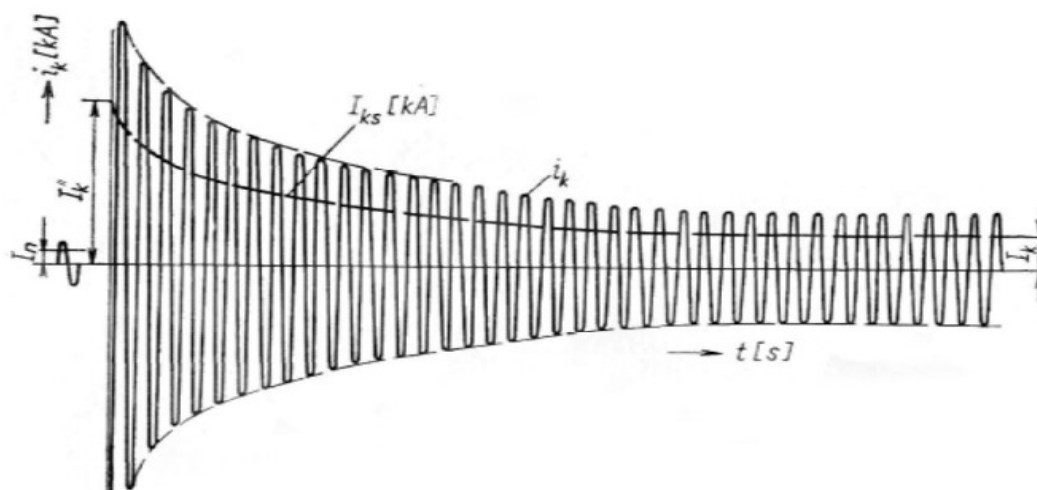
1. Rázová složka
2. Přechodová složka
3. Ustálená složka

Všechny tyto tři složky mají totožnou vlastnost, mají sinusový průběh o frekvenci soustavy. Amplitudy rázové a přechodové složky exponenciálně klesají o vlastních časových konstantách. Rázová složka se projevuje na začátku zkratu a velice rychle doznívá, její trvání se pohybuje pod desetinou sekundy. Přechodová složka doznívá pomaleji než složka rázová, trvání přechodové složky se pohybuje v jednotkách sekund. Ustálená složka se po celou dobu zkratu nemění a její amplituda tudíž zůstává konstantní.





Obr. 9 Průběh nesouměrného zkratového proudu [3]



Obr. 10 Střídavá složka zkratového proudu [3]

### 2.4.3. Hodnoty pro dimenzování

Při výpočtech zkratového proudu se také zajímáme o další zmíněné hodnoty, protože jsou důležité při dimenzování elektrických zařízení.

#### Počáteční rázový zkratový proud

Jedná se o největší efektivní hodnotu souměrné složky zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu. Hodnota počátečního rázového zkratu má zásadní vliv při volbě velikosti vypínačů a jističů. [1]

#### Vypínaný zkratový proud

Jde o zkratový proud v okamžiku vypnutí vypínačem. Používá se pro určení velikosti vypínačů.

### Ekvivalentní oteplovací zkratový proud

Jedná se o efektivní hodnotu ekvivalentního souměrného zkratového proudu, který vyvolává tepelné namáhání zařízení. Používá se pro stanovení tepelného namáhání elektrického zařízení. [2]

### Nárazový zkratový proud

Nárazový zkratový proud je vrcholová hodnota amplitudy (často se jedná o první amplitudu) zkratového proudu. Je to hodnota se zásadním vlivem při určení mechanického namáhání zkratového obvodu.

## 2.5. Následky zkratového proudu

Přestože působení zkratových proudů je krátkodobé, tak se projevuje nepříznivými následky, které ohrožují bezpečnost provozu, elektrického zařízení i obsluhující personál. Je proto nutné elektrická zařízení dimenzovat s ohledem na poměry při zkratu. Mezi účinky zkratového proudu patří:

### 2.5.1. Dynamické účinky

Důvodem vzniku dynamických sil v elektrických zařízení je elektromagnetické působení proudů ve vedlejších vodičích a způsobuje mechanické namáhání. Velikost dynamické síly je přímo úměrná velikosti proudu procházejícího vodičem. Největší silový ráz je způsoben nárazovým zkratovým proudem a jeho hodnota dosahuje, tak vysokých hodnot, že může vážně ohrozit elektrická zařízení. Pokud není elektrické zařízení dostatečně dimenzováno, můžou mít dynamické síly vážné následky.

Dynamické síly namáhají vodiče na ohyb, působí na průchodky a podpěrky, namáhají vinutí a jejich upevnění (vinutí silových transformátorů, přístrojových transformátorů proudů, měřících přístrojů, tlumivek, reaktorů, primárních relé, čela vinutí a póly alternátorů) a všechny přístroje, které jsou ve zkratovém obvodu. U venkovních vedení způsobují tyto síly výkyvy vodičů, což může zapříčinit zmenšení vzdušné vzdálenosti na takovou hodnotu, že poté mezi vodiči dochází k přeskokům. Ohybem vodičů může dojít k trvalé deformaci vodičů a jejich dotyku nebo přiblížením natolik, že může nastat nový zkrat. [1]

### 2.5.2. Tepelné účinky

Zkratový proud procházející zkratovým obvodem, způsobuje tepelné ztráty, které se projevují nadměrným zahříváním všech částí zkratového obvodu. Vzniklé tepelné ztráty lze vypočítat dle vztahu  $Q = RI^2t$ . Část vzniklého tepla tepelnými účinky zkratového proudu se odvede chlazením do okolí, ale většina takto vzniklého tepla během krátké doby trvání zkratu nemůže být odvedena chlazením do okolí a způsobuje velké zahřívání. Toto velké zahřívání může způsobit předčasné stárnutí izolace vodičů, přístrojů a strojů, spálení vinutí strojů a přístrojů a ke spékání kontaktů spínacích přístrojů.

Velmi nebezpečná situace může nastat při přehřátí části přístroje nebo vodiče při teplotách 100 °C až 150 °C. Při takto vysokých teplotách dochází k sublimaci izolace, při které vznikají výbušné plyny jako jsou acetylén nebo vodík. Pokud potom dojde v dalším průběhu zkratu k rozstříkování rozpáleného kovu, rozžhavení vodičů nebo k přeskoku, směs plynu a vzduchu exploduje. Tato exploze vyvolá tlaky několika atmosfér, v uzavřených místnostech má velice silné ničivé účinky.

### 2.5.3. Obloukový zkrat

Obloukový zkrat se může vyskytovat ve všech případech zkratu. V rozvodných zařízeních vzniká především špatnou manipulací s odpojovači a ohrožuje zde převážně obsluhující personál. Doba tvorby oblouku je krátká a pohybuje se v  $\mu\text{s}$ , přičemž dosahuje velkých hodnot okolo MW na cm délky oblouku.

Účinky elektrického oblouku jsou způsobeny hlavně jeho tlakem a zářením, které jsou vyvolány obrovskou energií oblouku a světelným a tepelným zářením. Elektrický oblouk může vydávat ultrafialové, infračervené, tepelné a viditelné záření. Na záření se podílí i hliníkové páry. Tyto záření způsobují nadměrně vysoké teploty, které zahřívají blízké předměty. Teplota elektrického oblouku není ve všech místech totožná. Nejvyšší hodnoty přibližně 15 000 K dosahuje teplota oblouku v jeho ose, v patách elektrického oblouku teploty dosahují 3 000 až 4 500 K. Při těchto vysokých teplotách v patách oblouku dochází k tavení materiálu elektrod a k jeho rozstříkávání vlivem vzniklého tlaku.

Tlakové namáhání je vyvoláno expanzivními tlaky plynů a par, které jsou úměrné nárazovému zkratovému proudu. Největší tlak vzniká přibližně v čase 12 ms po zapálení oblouku, a proto je nemožné ho zachytit v uzavřeném prostoru. U mezistěn kobkových rozvodů dochází k deformaci konstrukce kombinovaným vlivem tlaku a tepla při nedostatečné mechanické pevnosti.

### 2.5.4. Pokles napětí

Pokles napětí bývá způsoben úbytky napětí, které jsou způsobovány zkratovým proudem na impedancích prvků sítě. Tento pokles napětí má výrazný vliv na spotřebiče, které jsou připojeny na rozvod mezi zdrojem a místem zkratu. Vliv, který pokles napětí způsobuje na spotřebiče je závislý na druhu spotřebiče, na který působí. U světelných zdrojů žárových při poklesu napětí dochází ke zmenšení světelného toku a při poklesu na zhášecí napětí můžou světelné zdroje výbojkové zhasnout.

U tepelných spotřebičů závisí výkon na druhé mocnině napětí. Při poklesu napětí na 80 % jmenovité hodnoty klesne výkon na 64 % jmenovité hodnoty. U motorů asynchronních, synchronních a stejnosměrných pokles napětí způsobí pokles točivého momentu.

### 2.5.5. Přepětí

Přepětí je nebezpečné zejména při vypínání zkratových proudů, kdy dosahuje hodnoty až dvojnásobku jmenovité hodnoty. Nebezpečné u přepětí není jen jeho velikost ale i jeho strmost a pokud je strmost zotaveného napětí vyšší než rychlost zotavení elektrické pevnosti vypínací dráhy, pak dochází k opětovnému zapálení oblouku a případné havárii vypínače. K vyšším hodnotám přepětí dochází při vypínání zemních zkratů v kompenzovaných sítích a při přerušování proudu pojistkami. Při vypínání dvoufázových zemních zkratů dosahuje hodnota přepětí až čtyř a půl násobku jmenovité hodnoty napětí.

### 3. Metodika výpočtu zkratových poměrů dle EN 60909

#### 3.1. Předpoklady výpočtu

Kvůli zjednodušení výpočtu minimálního a maximálního zkratového proudu se počítá s následujícími zjednodušení:

- a) Po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu, jinými slovy trojfázový zkrat zůstává třífázovým a zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu zkratu zkratem mezi fází a zemí.
- b) Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti.
- c) Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze. To je přípustné, protože je zaveden korekční součinitel pro impedance  $K_T$  pro síťové transformátory.
- d) Odpory oblouků se neuvažují.
- e) Všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě.

Výpočty zaručují dostatečnou přesnost výsledků, ale nelze zmíněné předpoklady brát za zcela odpovídající skutečnosti.

Pokud se počítají zkratové proudy s rozdílnými hladinami napětí, je třeba přepočítat hodnoty impedancí z jedné napěťové hladiny na jinou napěťovou hladinu. Bývá to napěťová hladina, ve které se má určit zkratový proud. [2]

#### 3.2. Metoda výpočtu

##### 3.2.1. Použití souměrných složek

Pro zjednodušení výpočtu hodnot proudů v trojfázové střídavé soustavě při souměrných a nesouměrných zkratech používáme souměrné složky. Základním předpokladem pro použití souměrných složek je, že elektrické zařízení má symetrickou strukturu. Výsledky výpočtu mají potom dostatečnou přesnost.

Vyskytují se zde tři složkové soustavy:

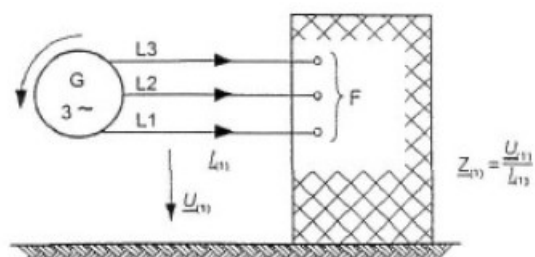
- 1) Sousedná složka zkratové impedance  $\underline{Z}_{(1)}$
- 2) Zpětná složka zkratové impedance  $\underline{Z}_{(2)}$
- 3) Netočivá složka zkratové impedance  $\underline{Z}_{(0)}$

Souslednou složku zkratové impedance  $\underline{Z}_{(1)}$  určíme přiložením souměrné soustavy napětí sousledné složky v odpovídajícím kladném pořadí fází do místa zkratu F. Všechny asynchronní a synchronní stroje jsou nahrazeny jejich vnitřními impedancemi.

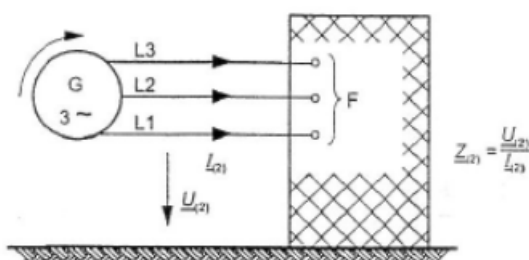
Zpětnou složku zkratové impedance  $\underline{Z}_{(2)}$  určíme přiložením souměrné soustavy napětí sousledné složky v odpovídajícím záporném pořadí fází do místa zkratu F.

Netočivou složku zkratové impedance  $\underline{Z}_{(0)}$  určíme přiložením střídavého napětí mezi třemi zkratovanými fázemi a společným zpětným vedením. Například zemnicí vodič, zemnicí soustava, nulový vodič, stínění kabelů a pláště kabelů.

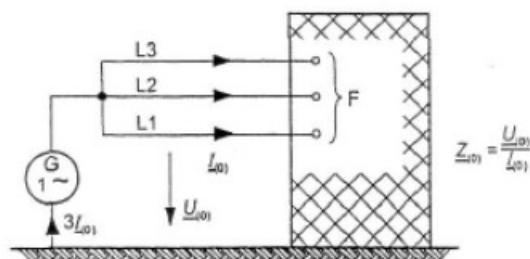
Hodnoty zpětných a sousledných impedancí se v případě točivých strojů mohou navzájem lišit. V případě výpočtu elektrický vzdáleného zkratů, je dovoleno uvažovat  $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$ .



Obr. 11 Sousledná složka zkratové impedance  $Z(1)$  [2]



Obr. 12 Zpětná složka zkratové impedance  $Z(2)$  [2]



Obr. 13 Netočivá složka zkratové impedance  $Z(0)$  [2]

### 3.2.2. Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu

Tato metoda je založena na zavedení ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu. Jediným aktivním napětím v soustavě je ekvivalentní napěťový zdroj. Všechny synchronní, asynchronní a síťové napáječe jsou nahrazeny jejich vnitřní impedancí. Ve všech případech se k určení zkratového proudu v místě F použije ekvivalentní napěťový zdroj.

Provozní údaje o odběrech, buzení generátorů, o poloze přepínače odboček transformátorů nejsou pro výpočty důležité, v tomto případě není nutné provádět výpočty toků výkonů v různých stavech před zkratem. [2]

### 3.3. Minimální zkratové proudy

Při výpočtu minimálních zkratových proudů je důležité zvolit podmínky:

- a) Musí se zvolit napěťový činitel  $c_{\min}$ .
- b) Musí se zvolit vhodnou kombinaci soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby v postiženém místě zkratu vznikla minimální hodnota zkratového proudu.
- c) Motory musí být zanedbány.
- d) Rezistenci  $R_L$  vedení (vodičů a středních vodičů, venkovních vedení a kabelů) se musí počítat při nejvyšší hodnotě teploty.

### 3.4. Maximální zkratové proudy

Pro výpočet maximálních zkratových proudů je důležité zvolit podmínky:

- a) Pokud není příslušná norma, pak musíme použít pro výpočet maximálních zkratových proudů napěťový součinitel  $c_{\max}$ .
- b) Musí se zvolit vhodnou kombinaci soustavy a maximální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby v postiženém místě zkratu vznikla maximální hodnota zkratového proudu.
- c) Pokud se použije ekvivalentní impedance  $\underline{Z}_Q$ , reprezentující vnější síť, musí se použít minimální ekvivalentní zkratová impedance, která odpovídá maximálnímu příspěvku zkratových proudů od síťových napáječů.
- d) Vliv asynchronních motorů se musí uvážit dle potřeby
- e) Rezistence  $R_L$  vedení (venkovní vedení a kabelů) se uvažuje při teplotě 20 °C

$$R_L = [1 + \alpha \cdot (\theta_e - 20 \text{ }^{\circ}\text{C})] \cdot R_{L20} \quad (1)$$

Kde

$R_L$  – je rezistence vedení

$\alpha$  – je teplotní součinitel elektrického odporu

$\theta_e$  – je teplota vodiče na konci zkratu

$R_{L20}$  – je rezistence při teplotě 20 °C

*Tab. 1 Napěťový součinitel c*

Jmenovité napětí $U_n$	Napěťový součinitel c	
	Maximálních zkratových proudů $c_{\max}$	Minimálních zkratových proudů $c_{\min}$
Nízké napětí 100 V až 1 kV	1,05 1,10	0,95
Vysoké napětí 1 kV až 35 kV	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí nad 35 kV		

Hodnota  $c_{\max} = 1,05$  pro nízká napětí se používá pro soustavy s tolerancí + 6%

Hodnota  $c_{\max} = 1,10$  pro nízká napětí se používá pro soustavy s tolerancí + 10%

## 4. Parametry prvků soustavy

Při stanovování hodnot parametrů vypočtených parametrů soustavy se vychází ze skutečných parametrů zjištěných pomocí měření. Pokud nejsou známy tyto hodnoty, musí se použít jmenovité, orientační nebo střední hodnoty, které zajistí dostatečnou přesnost výpočtu.

U transformátorů se počítá s fiktivním převodem daným poměrem jmenovitých hodnot napětí sítí, které spojují. U transformátorů připojených na svorky alternátoru, které nenapájí spotřebiče přímo, se fiktivní převod odvozuje z jmenovitého napětí alternátorů. [3]

Při výpočtu zkratových proudů se používá fázové napětí zdrojů  $U_{\text{vyp}}$

$$U_{\text{vyp}} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

Kde

$U_{\text{vyp}}$  – je výpočtové napětí

$c$  – je součinitel pro výpočet zkratových proudů

$U_n$  – je jmenovité napětí

### 4.1. Impedance elektrického zařízení

Sousledná impedance  $Z_{(1)}$  zařízení se určí jako poměr  $U_{(1)} / I_{(1)}$ , kde  $U_{(1)}$  je sousledné fázové napětí a proud  $I_{(1)}$  protéká při zkratu jednou fází.

Zpětná impedance  $Z_{(2)}$  zařízení se určí jako poměr  $U_{(2)} / I_{(2)}$ , kde  $U_{(2)}$  je zpětné fázové napětí a proud  $I_{(2)}$  protéká při zkratu jednou fází.

Hodnota zpětné impedance  $Z_{(2)}$  a sousledné impedance  $Z_{(1)}$  jsou si rovny u elektrických zařízení (transformátory, venkovní a kabelové vedení), tato rovnost neplatí u točivých strojů.

Netočivá impedance  $Z_{(0)}$  zařízení se určí jako poměr  $U_{(0)} / I_{(0)}$ , kde  $U_{(0)}$  je netočivé fázové napětí uvažované mezi svorkami paralelně řazených fází a zpětnou cestou (zem, nulový vodič) a proud  $I_{(0)}$ , který protéká fázovým vodičem. Ve zpětné cestě protéká trojnásobek hodnoty proudu.

### 4.2. Určení impedancí elektrického zařízení

#### 4.2.1. Soustava

Náhradní reaktanci soustavy určujeme při trojfázovém zkratu z proudu  $I''_k$  (počáteční rázový zkratový proud) a při jednofázovém zkratu z proudu  $I''_{k(1)}$

Sousledná impedance soustavy:

$$Z_{(1)} = \frac{U_{\text{vyp}}}{I''_{k(3)}} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I''_{k(3)}} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k} \quad (3)$$



Zpětná impedance soustavy je totožná sousledné impedanci a řídí se vztahem  $Z_{(1)} = Z_{(2)}$ .

Netočivá impedance soustavy:

$$Z_{(0)} = U_{\text{vyp}} \cdot \left( \frac{3}{I''_{k(1)}} - \frac{2}{I''_{k(3)}} \right) = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \cdot \left( \frac{3}{I''_{k(1)}} - \frac{2}{I''_{k(3)}} \right) \quad (4)$$

Souměrnou impedanci soustavy můžeme vypočítat i v poměrných hodnotách

$$Z_{(1)} = \frac{c \cdot S_V}{S_k} \quad (5)$$

Kde

$U_{\text{vyp}}$  – je výpočtové napětí

$c$  – je součinitel pro výpočet zkratových proudů

$U_n$  – je jmenovité napětí

$I''_{k(3)}$  – je počáteční rázový zkratový proud soustavy při trojfázovém zkratu

$I''_{k(1)}$  – je počáteční rázový zkratový proud soustavy při jednofázovém zkratu

$S_V$  – je vztažený výkon

$S_k$  – zkratový výkon soustavy

#### 4.2.2. Alternátor

Pro přesný výpočet reaktance alternátorů je potřeba si vyžádat parametry od výrobce alternátorů.

Sousledná reaktance:

$$X_{(1)} = \frac{x''_d}{100} \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} \quad (6)$$

Souměrná reaktance lze zapsat i v poměrných jednotkách:

$$x_{(1)} = \frac{x''_d}{100} \cdot \frac{S_V}{S_{nG}} \quad (7)$$

Kde

$x''_d$  – je rázová (subtranzitní) reaktance

$U_{nG}$  – je jmenovité napětí alternátoru

$S_{nG}$  – je jmenovitý zdánlivý výkon alternátoru

$S_V$  – je vztažený výkon

Zpětná reaktance alternátoru je totožná se souměrnou reaktancí  $X_{(1)} = X_{(2)}$ .

Netočivá reaktance  $X_{(0)}$  závisí na provedení vinutí alternátoru a proto je nutné si jej u výrobce vyžádat.

Činný odpor u alternátoru jde ve všech případech vynechat, protože dosahuje hodnoty 0,8 %  $X$ .

### 4.2.3. Dvouvinuťové transformátory

Sousledná impedance dvouvinuťového transformátoru v poměrných jednotkách  $z_{(1)}$  při výkonu transformátoru je dána jeho napětím nakrátko.

$$z_{(1)} = u_k = \sqrt{u_r^2 + u_x^2} \quad (8)$$

Kde

$u_r$  – je složka napětí nakrátko na činném odporu transformátoru

$u_x$  – je složka napětí nakrátko na induktivní reaktanci

Skutečná hodnota v ohmech se určí podle vztahu:

$$Z_{(1)} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} \quad (9)$$

Kde

$u_k$  – je jmenovité napětí nakrátko

$U_{nT}$  – je jmenovité napětí transformátoru

$S_{nT}$  – je jmenovitý výkon transformátoru

Hodnota složky  $u_r$  lze vypočítat z celkových ztrát transformátoru nakrátko při určitém výkonu transformátoru.

Poměrnou hodnotu souslednou reaktance dvouvinuťového transformátoru lze určit ze vztahu:

$$x_{(1)} = \sqrt{z_{(1)}^2 - r_{(1)}^2} \quad (10)$$

Činný odpor transformátoru lze může zanedbat, pokud jeho potřeba k přesnějšímu výpočtu, je poměrná hodnota jeho sousledné složky:

$$r_{(1)} = u_r \cdot \frac{S_V}{S_{nT}} = \frac{P_{knT} \cdot S_V}{S_{nT}^2} \quad (11)$$

Kde

$u_r$  – je složka napětí nakrátko na činném odporu transformátoru

$S_{nT}$  – je jmenovitý výkon transformátoru

$P_{knT}$  – jsou jmenovité ztráty nakrátko

$S_V$  – je vztažný výkon

Skutečná hodnota činného odporu transformátoru:

$$R_{(1)} = \frac{u_r}{100} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} \quad (12)$$

Při běžném výpočtu lze uvažovat  $Z_{(1)} = X_{(1)}$  při podmínce  $R_{(1)} = 0$ .

Netočivá reaktance dvouvinuťového transformátoru závisí na zapojení transformátoru a na jeho konstrukci.

#### 4.2.4. Trojvinut'ové transformátory

Pro výpočet uvažujeme jen souslednou reaktanci a zpětnou reaktanci mezi vinutími, kterými prochází zkratový výkon. Pokud jsou jen dvě, poté se třetí vinutí neuvažuje, také se vynechává vyrovnávací vinutí.

U těchto transformátorů můžeme vypočítat sousledné impedance  $\underline{Z}_A$ ,  $\underline{Z}_B$  a  $\underline{Z}_C$  pomocí tří zkratových impedancí (vztažených na stranu A transformátoru)

Při rozpojené straně C:

$$\underline{Z}_{AB} = \left( \frac{u_{rAB}}{100} + j \frac{u_{xAB}}{100} \right) \cdot \frac{U_{nTA}^2}{S_{nTAB}} \quad (13)$$

při rozpojené straně B:

$$\underline{Z}_{AC} = \left( \frac{u_{rAC}}{100} + j \frac{u_{xAC}}{100} \right) \cdot \frac{U_{nTA}^2}{S_{nTAC}} \quad (14)$$

při rozpojené straně A:

$$\underline{Z}_{BC} = \left( \frac{u_{rBC}}{100} + j \frac{u_{xBC}}{100} \right) \cdot \frac{U_{nTA}^2}{S_{nTBC}} \quad (15)$$

Pomocí vzorců:

$$\underline{Z}_A = 0,5 \cdot (\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{AC} - \underline{Z}_{BC}) \quad (16)$$

$$\underline{Z}_B = 0,5 \cdot (\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{AC}) \quad (17)$$

$$\underline{Z}_C = 0,5 \cdot (\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BC} - \underline{Z}_{AB}) \quad (18)$$

Kde

$u_{rAB}$  – jmenovitá činná složka napětí nakrátko mezi stranami A a B

$u_{xAB}$  – jmenovitá induktivní složka napětí nakrátko mezi stranami A a B

$u_{rAC}$  – jmenovitá činná složka napětí nakrátko mezi stranami A a C

$u_{xAC}$  – jmenovitá induktivní složka napětí nakrátko mezi stranami A a C

$u_{rBC}$  – jmenovitá činná složka napětí nakrátko mezi stranami B a C

$u_{xBC}$  – jmenovitá induktivní složka napětí nakrátko mezi stranami B a C

$U_{nTA}$  – jmenovité napětí na straně A

$S_{nTAB}$  – jmenovitý výkonu mezi stranami A a B

$S_{nTAC}$  – jmenovitý výkonu mezi stranami A a C

$S_{nTBC}$  – jmenovitý výkonu mezi stranami B a C

O velikosti netočivých impedancí nebo reaktancí rozhoduje zapojení jednotlivých vinutí. Zapojení vinutí do trojúhelníku je potřeba vždy respektovat při výpočtu netočivých impedancí, protože ovlivňuje velikost netočivých proudů ve vinutí s uzemněným středním bodem.

#### 4.2.5. Reaktory

Reaktory jsou indukční odpory bez železného jádra. Zařazují se do obvodu, kvůli omezování zkratového proudu. Sousedná procentní reaktance je podobná jako u alternátorů nebo transformátorů.

$$x_{(1)} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{S_V}{S_R} \quad (19)$$

Pokud jsou vinutí provedeny jako geometricky souměrné, pak je netočivá a zpětná složka reaktance stejná jako souměrná složka reaktance.

Impedance reaktoru se určuje z jmenovitých hodnot reaktoru.

$$Z_{(1)} = \frac{10 \cdot u_k \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} \quad (20)$$

Kde

$u_k$  – je impedanční napětí reaktoru

$U_n$  – je jmenovité sdružené napětí reaktoru

$I_n$  – je jmenovitý proud reaktoru

$S_V$  – je vztažný výkon

$S_R$  – je průchozí výkon reaktoru

Činný odpor reaktoru je oproti jeho reaktanci minimální a dosahuje hodnot menších, než je setina hodnoty reaktance.

#### 4.2.6. Venkovní vedení

Sousedná procentní reaktance venkovních vedení na stožárech nebo sloupech je dána výrazem:

$$x_{(1)} = X_{k(1)} \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_S^2} \cdot 100 \quad (21)$$

Analogický platí pro zpětnou a netočivou složku reaktance totožné vztahy.

Pro souslednou a zpětnou reaktanci vedení  $X_{(1)}$  a  $X_{(2)}$  platí vzorce, podle druhu vedení.

Pro vedení kroucené, s jedním vodičem do fáze:

$$X_{k(1)} = X_{k(2)} = 0,145 \cdot \log \frac{D}{r_e} \quad (22)$$

Pro vedení kroucené, s více vodiči na fázi (svazkové vodiče):

$$X_{k(1)} = X_{k(2)} = 0,145 \cdot \left( \log \frac{D}{d} + \frac{\log \frac{d}{r}}{n} \right) + \frac{0,015}{n} \quad (23)$$

Netočivá skutečná reaktance jednoduchého vedení s jedním vodičem:

$$X_{k(0)} = 0,435 \cdot \log \frac{D_z}{\sqrt[3]{r_e \cdot D^2}} \quad (24)$$

Činný odpor dosahuje u vodičů venkovních vedení hodnot, které mohou ovlivnit zkratové proudy, proto pokud zkratové proudy dosahují nepříznivých hodnot musíme uvažovat i s činným odporem.

Pro procentní činné odpory platí vztah:

$$r_{(1)} = R_{k(1)} \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_s^2} \cdot 100 \quad (25)$$

Pro sousledný a zpětný činný odpor vodičů se stanoví hodnoty ze vztahu:

$$R_{k(1)} = R_{k(2)} = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (26)$$

Kde

$l$  – je délka vodiče

$S$  – je průřez vodiče

$\rho$  – je měrný odpor vodiče

$S_V$  – je vztažený výkon

$U_s$  – je jmenovité sdružené napětí vedení

$D$  – je osová vzdálenost vodičů při souměrném vedení

$r_e$  – je ekvivalentní poloměr

$d$  – je střední geometrická vzdálenost mezi vodiči jednoho svazku

$n$  – je počet vodičů na jednu fázi

$D_z$  – je hloubka, ve které teče proud při zemním zkratu zemí

#### 4.2.7. Napájecí síť

Občasně stojíme před problémem, jak dimenzovat elektrická zařízení, která jsou připojena na elektrizační soustavu, u níž neznáme ani napájecí zdroje. Tato soustava přesto má určitou impedanci, která se nazývá impedance napájecí sítě  $z_s$ , která je nutná zahrnout do přesného výpočtu. Energetický rozvodný podnik musí udat kromě napětí i souměrný počáteční trojfázový zkratový výkon  $S_{sks}$ .

$$S_{sks} = k \cdot \frac{S_V}{z_s} \cdot 100 \quad (27)$$

Z tohoto vztahu lze určit impedanci sítě

$$z_s = k \cdot \frac{S_V}{S_{sks}} \cdot 100 \quad (28)$$

Při zanedbání činného odporu jsou si hodnoty impedance a reaktance rovny a bude pro ně platit totožný vztah.

Při výpočtu zkratových proudů při zkratu za transformátory vn/nn, musíme předpokládat napájecí síť nekonečného výkonu, takže zkratový výkon sítě bude roven nekonečnu  $S_{sks} = \infty$ . Podle tohoto předpokladu poté budou hodnoty impedance, reaktance a odporu rovny nule.

Pro určení nulové reaktance sítě musíme znát hodnotu jednofázového zkratového proudu, který opět udává energetický rozvodný podnik. Z této hodnoty jednofázového zkratového proudu můžeme určit vztah pro výslednou jednofázovou reaktanci sítě:

$$x_{vs(1)} = \frac{3 \cdot I_V}{I_{sks(1)}} \cdot 100 \quad (29)$$

Následně můžeme vypočítat hodnotu netočivé procentní reaktance netočivé sítě:

$$x_{s(0)} = x_{vs(1)} - x_{s(1)} - x_{s(2)} \quad (30)$$

Kde

$k$  – je součinitel respektující zatížení stroje

$S_V$  – je vztažný výkon

$S_{sks}$  – je souměrný počáteční trojfázový zkratový výkon

$z_s$  – je impedance sítě

$I_V$  – je vztažný proud

$I_{sks(1)}$  – je jednofázového zkratového proudu

## 5. Výpočet zkratových proudů

U vzdáleného zkratu se zkratový proud vypočítává sečtením střídavé složky zkratového proudu, která má neměnnou amplitudu, a stejnosměrné složky, která z počáteční hodnoty klesá na hodnotu rovné nule.

V případě blízkého zkratu se zkratový proud vypočítává sečtením střídavé složky, jejichž amplituda se zmenšuje, a stejnosměrné složky, která z počáteční hodnoty klesá na hodnotu rovné nule.

Velikost zkratového proudu je ovlivněna typem zkratu a hodnotami sousledných, zpětných a nulových zkratových impedancí soustavy, přičemž je dovoleno uvažovat, že sousledná a zpětná složka  $Z_{(1)} = Z_{(2)}$  mají stejnou velikost.

### 5.1. Počáteční souměrný rázový proud $I_k$

#### 5.1.1. Jednofázový zkratový proud

Výpočet počátečního zkratového proudu při jednofázovém zkratu lze vypočítat následujícím vzorcem ve fyzikálních jednotkách.

$$I_{k(1)}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}|} \quad (31)$$

Můžeme ho vypočítat i v poměrných hodnotách.

$$I_{k(1)}'' = \frac{c \cdot 3 \cdot I_V}{|Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}|} \quad (32)$$

#### 5.1.2. Dvoufázový zkratový proud

Výpočet počátečního zkratového proudu při dvoufázovém zkratu lze vypočítat následujícím vzorcem ve fyzikálních jednotkách.

$$I_{k(2)}'' = \frac{c \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} \quad (33)$$

Za předpokladu rovnosti  $Z_{(1)} = Z_{(2)}$  lze tento vzorec zapsat:

$$I_{k(2)}'' = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot |Z_{(1)}|} \quad (34)$$

Počáteční zkratový proud při dvoufázovém zkratu lze vypočítat i v poměrných hodnotách.

$$I_{k(2)}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot I_V}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot I_V}{2 \cdot |Z_{(1)}|} \quad (35)$$

### 5.1.3. Trojfázový zkratový proud

Výpočet počátečního zkratového proudu při trojfázovém zkratu lze vypočítat následujícím vzorcem ve fyzikálních jednotkách.

$$I_{k(3)}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)}|} \quad (36)$$

Můžeme ho vypočítat i v poměrných hodnotách.

$$I_{k(3)}'' = \frac{c \cdot I_V}{|Z_{(1)}|} \quad (37)$$

### 5.2. Stejnoseměrná složka zkratového proudu

Velikost stejnosměrné složky zkratového proudu klesá z původní hodnoty na hodnotu rovnou nule a velikost této hodnoty lze vypočítat následujícím vztahem.

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} \cdot I_k'' \cdot e^{-\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot t \cdot R}{X}} \quad (38)$$

Kde

$I_k''$  – je počáteční souměrný rázový proud

$f$  – je jmenovitý kmitočet

$t$  – je čas

$R/X$  – je poměr

### 5.3. Nárazový zkratový proud

U nárazového zkratového proudu se předpokládá, že při vzniku napětí prochází nulovou hodnotou a že tohoto proudu se dosahuje po polovině prvního cyklu.

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (39)$$

Součinitel  $\kappa$  se vypočítává z následujícího vztahu.

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} \quad (40)$$



## 5.4. Ekvivalentní oteplovací proud

Pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu se používá Jouleův integrál, který stanovuje energii, která se tvoří v odporovém prvku průchodem zkratového proudu. Ve vztahu se energie vypočítává za použití součinitele  $m$  pro časově závislý tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu a součinitele  $n$  pro časově závislý tepelný účinek střídavé složky.

$$\int_0^{T_k} i^2 dt = i_k''^2 \cdot (m + n) \cdot T_k = I_{th}^2 \cdot T_k \quad (41)$$

Ekvivalentní oteplovací proud lze vypočíst vzorcem:

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} \quad (42)$$

## 5.5. Ustálený zkratový proud

Ustálený zkratový proud se vypočítává méně přesněji než výpočet počátečního rázového zkratového proudu. Synchronní stroje se závislým statickým budičem při vzniku zkratu na svorkách, nepřispívají k ustálenému zkratovému proudu. V případě maximálního buzení synchronního stroje počítáme s maximálním ustáleným zkratovým proudem a hodnotu tohoto proudu vypočítáme ze vztahu:

$$I_{kmax} = \lambda_{max} \cdot I_{rG} \quad (43)$$

V případě vzniku zkratu z elektrárenského bloku s konstantním buzením nezatíženého synchronního stroje nebo při vzniku zkratu z jednoho generátoru se vypočítává minimální ustálený zkratový proud podle vzorce:

$$I_{kmin} = \lambda_{min} \cdot I_{rG} \quad (44)$$

Hodnoty součinitele  $\lambda_{min}$  a  $\lambda_{max}$  se odečítají z příslušných grafů z normy CSN EN 60909.

## 5.6. Souměrný vypínací zkratový proud

Souměrný vypínací zkratový proud se skládá ze dvou složek.

Prvním je symetrický zkratový proud  $I_b$  a druhou složkou je stejnosměrná složka zkratového proudu  $i_{d.c.}$ . V případě vzdáleného zkratu jsou souměrné vypínací proudy totožné hodnotám počátečním rázovým zkratovým proudům pro různé typy zkratů. V případě blízkého zkratu lze souměrný vypínací proud vypočíst ze vztahu:

$$I_b = \mu \cdot I_k'' \quad (45)$$

Součinitel  $\mu$  závisí na době vypnutí  $t_{min}$  a poměru zkratového proudu generátoru a jmenovitého proudu generátoru  $I_{kG}'' / I_{rG}$ .

Hodnota součinitele  $\mu$  se může brát jako hodnota rovna 1 za předpokladu, že není známá přesná hodnota. Jiné hodnoty se mohou použít, pokud jsou synchronní stroje buzeny pomocí statických budičů nebo točivých budičů a tyto hodnoty se berou ze vzorců vypsanych níže.

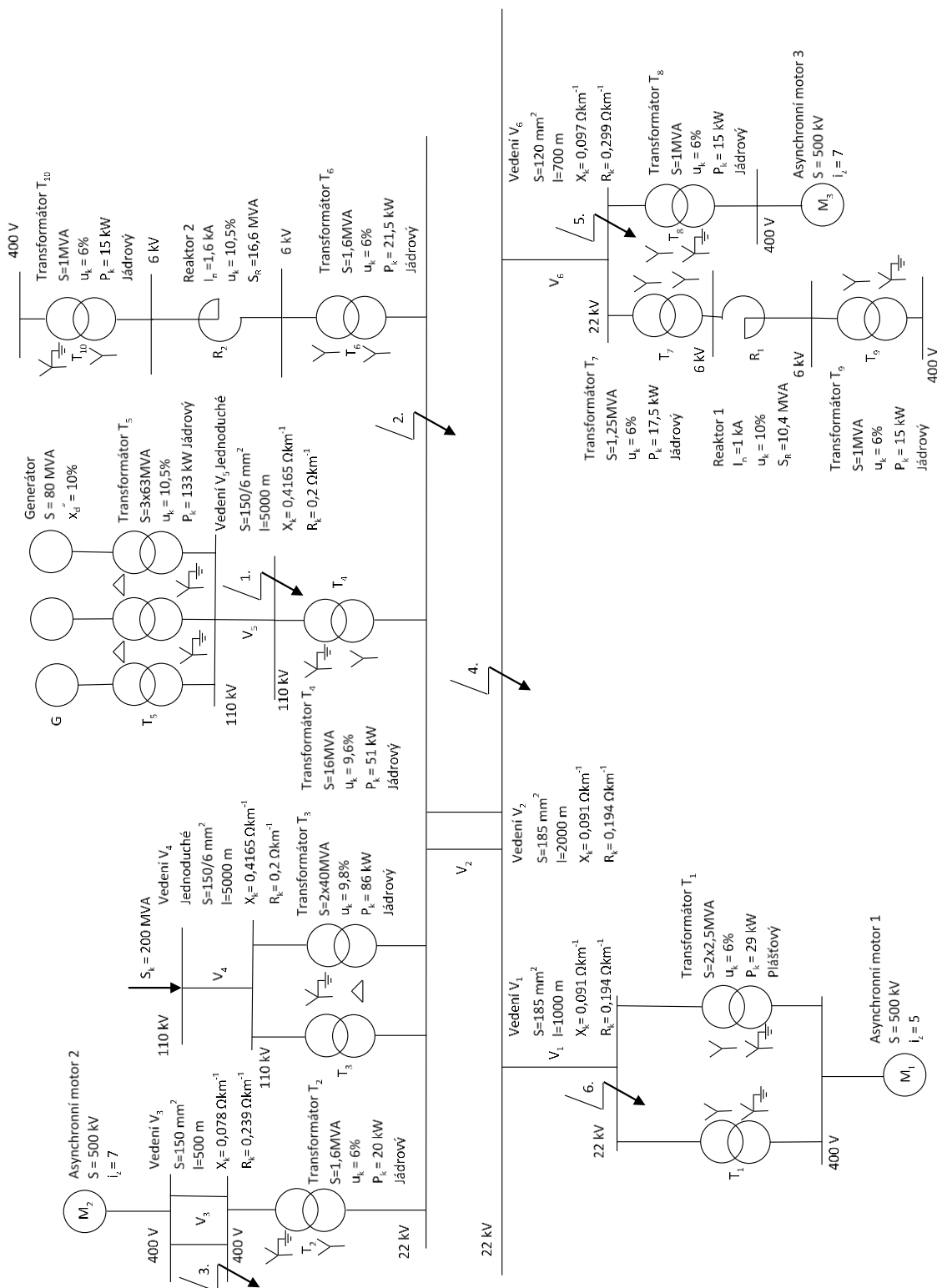
$$\mu = 0,84 + 0,26 \cdot e^{-0,26 \frac{I_{KG}''}{I_{rG}}} \quad \text{pro } t_{min} = 0,02 \text{ s} \quad (46)$$

$$\mu = 0,71 + 0,51 \cdot e^{-0,3 \frac{I_{KG}''}{I_{rG}}} \quad \text{pro } t_{min} = 0,05 \text{ s} \quad (47)$$

$$\mu = 0,62 + 0,72 \cdot e^{-0,32 \frac{I_{KG}''}{I_{rG}}} \quad \text{pro } t_{min} = 0,1 \text{ s} \quad (48)$$

$$\mu = 0,56 + 0,94 \cdot e^{-0,38 \frac{I_{KG}''}{I_{rG}}} \quad \text{pro } t_{min} \geq 0,25 \text{ s} \quad (49)$$

## 6. Výpočet zkratových poměrů



Obr. 14 Praktický příklad

## Parametry jednotlivých prvků

Zvolená hodnota pro vztažný výkon je  $S_V = 200$  MVA

Hodnota pro zkratový výkon je  $S_k = 200$  MVA

Tab. 2 Parametry transformátorů

	S (MVA)	$u_k$ (%)	$P_k$ (MW)	Typ
T <sub>1</sub>	2,5	6	0,029	Plášťový
T <sub>2</sub>	1,6	6	0,02	Jádrový
T <sub>3</sub>	40	9,8	0,086	Jádrový
T <sub>4</sub>	16	9,6	0,051	Jádrový
T <sub>5</sub>	63	10,5	0,133	Jádrový
T <sub>6</sub>	1,6	6	0,0215	Jádrový
T <sub>7</sub>	1,25	6	0,0175	Jádrový
T <sub>8</sub>	1	6	0,015	Jádrový
T <sub>9</sub>	1	6	0,015	Jádrový
T <sub>10</sub>	1	6	0,015	Jádrový

Tab. 3 Parametry vedení

	$X_k$ ( $\Omega\text{km}^{-1}$ )	$R_k$ ( $\Omega\text{km}^{-1}$ )	$l$ (km)	$S$ (mm <sup>2</sup> )
V <sub>1</sub>	0,091	0,194	1	185
V <sub>2</sub>	0,091	0,194	2	185
V <sub>3</sub>	0,078	0,239	0,5	150
V <sub>4</sub>	0,4165	0,2	5	150/6
V <sub>5</sub>	0,4165	0,2	5	150/6
V <sub>6</sub>	0,097	0,299	0,7	120

Vedení V<sub>4</sub> a V<sub>5</sub> jsou s jednoduchým provedením a se zemnicími lany AlFe.

Tab. 4 Parametry asynchronních motorů

	S (MVA)	$i_z$
AM <sub>1</sub>	0,5	5
AM <sub>2</sub>	0,5	7
AM <sub>3</sub>	0,5	7

Tab. 5 Parametry reaktorů

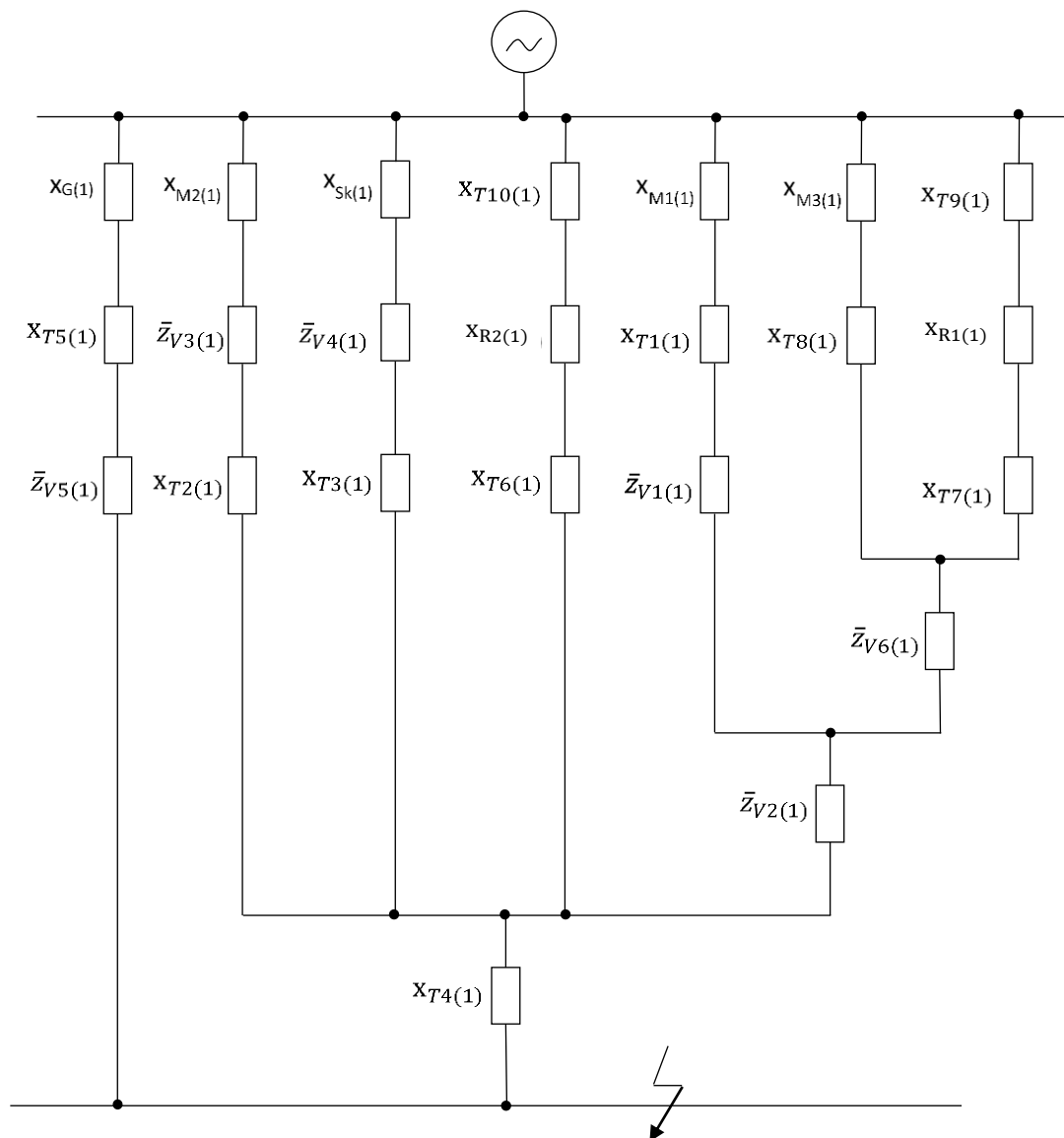
	$I_n$ (A)	$u_k$ (%)	$S_r$ (MVA)
R <sub>1</sub>	1000	10	10,4
R <sub>2</sub>	1600	10,5	16,6

Tab. 6 Parametry generátoru

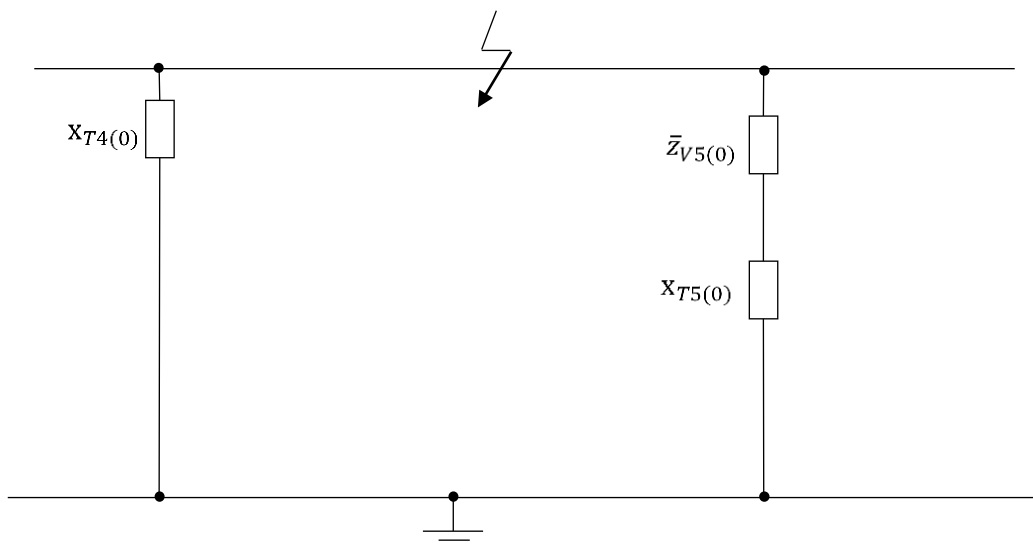
	S (MVA)	$x_d''$ (%)
G	80	10

Většina parametrů prvků byla převzata od Krejčí.P.: Cvičení z elektroenergetiky. Ostrava 2003 [5]

### 6.1. Výpočet počátečního zkratového proudu v bodě 1.



Obr. 15 Náhradní schéma zkratového obvodu pro sousledné složky v bodě 1.



Obr. 16 Náhradní schéma zkratového obvodu pro netočivé složky v bodě 1.

### 6.1.1. Výpočet počátečního zkratového proudu v poměrných hodnotách

#### Výpočet sousledných parametrů prvků

Vztažný výkon  $S_v = 200$  MVA

**Reaktance transformátorů:**

$$x_{T1(1)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{u_k \cdot S_v}{100 \cdot S_{T1}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{6 \cdot 200}{100 \cdot 2,5} = j2,4$$

$$x_{T2(1)} = \frac{u_k \cdot S_v}{100 \cdot S_{T2}} = \frac{6 \cdot 200}{100 \cdot 1,6} = j7,5$$

$$x_{T3(1)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{u_k \cdot S_v}{100 \cdot S_{T3}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{9,8 \cdot 200}{100 \cdot 40} = j0,245$$

$$x_{T4(1)} = \frac{u_k \cdot S_v}{100 \cdot S_{T4}} = \frac{9,6 \cdot 200}{100 \cdot 16} = j1,2$$

$$x_{T5a(1)} = \frac{u_k \cdot S_v}{100 \cdot S_{T5}} = \frac{10,5 \cdot 200}{100 \cdot 63} = j0,3333$$

Protože jsou zapojeny 3 transformátory  $T_5$  paralelně tak výsledná reaktance  $x_{T5(1)}$  bude rovna:

$$x_{T5(1)} = \frac{1}{\frac{1}{x_{T5a(1)}} + \frac{1}{x_{T5a(1)}} + \frac{1}{x_{T5a(1)}}} = \frac{1}{\frac{1}{j0,3333} + \frac{1}{j0,3333} + \frac{1}{j0,3333}} = j0,1111$$

$$x_{T6(1)} = \frac{u_k \cdot S_V}{100 \cdot S_{T6}} = \frac{6 \cdot 200}{100 \cdot 1,6} = j7,5$$

$$x_{T7(1)} = \frac{u_k \cdot S_V}{100 \cdot S_{T7}} = \frac{6 \cdot 200}{100 \cdot 1,25} = j9,6$$

$$x_{T8(1)} = \frac{u_k \cdot S_V}{100 \cdot S_{T8}} = \frac{6 \cdot 200}{100 \cdot 1} = j12$$

$$x_{T9(1)} = \frac{u_k \cdot S_V}{100 \cdot S_{T9}} = \frac{6 \cdot 200}{100 \cdot 1} = j12$$

$$x_{T10(1)} = \frac{u_k \cdot S_V}{100 \cdot S_{T10}} = \frac{6 \cdot 200}{100 \cdot 1} = j12$$

**Činný odpor a reaktance vedení:**

Vedení  $V_1$

$$x_{V1(1)} = X_k \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,091 \cdot 1 \cdot \frac{200}{22^2} = j0,0376$$

$$r_{V1(1)} = R_k \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,194 \cdot 1 \cdot \frac{200}{22^2} = 0,0802$$

$$\bar{z}_{V1(1)} = r_{V1(1)} + jx_{V1(1)} = 0,0802 + j0,0376$$

Vedení  $V_2$

$$x_{V2(1)} = \frac{1}{2} \cdot X_k \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = \frac{1}{2} \cdot 0,091 \cdot 2 \cdot \frac{200}{22^2} = j0,0376$$

$$r_{V2(1)} = \frac{1}{2} \cdot R_k \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = \frac{1}{2} \cdot 0,194 \cdot 2 \cdot \frac{200}{22^2} = 0,0802$$

$$\bar{z}_{V2(1)} = r_{V2(1)} + jx_{V2(1)} = 0,0802 + j0,0376$$

### Vedení $V_3$

$$x_{V3(1)} = \frac{1}{2} \cdot X_k \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = \frac{1}{2} \cdot 0,078 \cdot 0,5 \cdot \frac{200}{0,4^2} = j24,375$$

$$r_{V3(1)} = \frac{1}{2} \cdot R_k \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = \frac{1}{2} \cdot 0,239 \cdot 0,5 \cdot \frac{200}{0,4^2} = 74,6875$$

$$\bar{z}_{V3(1)} = r_{V3(1)} + x_{V3(1)} = 74,6875 + j24,375$$

### Vedení $V_4$

$$x_{V4(1)} = X_k \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,2 \cdot 5 \cdot \frac{200}{110^2} = j0,0344$$

$$r_{V4(1)} = R_k \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,4165 \cdot 5 \cdot \frac{200}{110^2} = 0,0165$$

$$\bar{z}_{V4(1)} = r_{V4(1)} + x_{V4(1)} = 0,0165 + j0,0344$$

### Vedení $V_5$

$$x_{V5(1)} = X_k \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,2 \cdot 5 \cdot \frac{200}{110^2} = j0,0344$$

$$r_{V5(1)} = R_k \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,4165 \cdot 5 \cdot \frac{200}{110^2} = 0,0165$$

$$\bar{z}_{V5(1)} = r_{V5(1)} + x_{V5(1)} = 0,0165 + j0,0344$$

### Vedení $V_6$

$$x_{V6(1)} = X_k \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,097 \cdot 0,7 \cdot \frac{200}{22^2} = j0,0281$$

$$r_{V6(1)} = R_k \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,299 \cdot 0,7 \cdot \frac{200}{22^2} = 0,0865$$

$$\bar{z}_{V6(1)} = r_{V6(1)} + x_{V6(1)} = 0,0865 + j0,0281$$

### **Reaktance Asynchronních motorů:**

$$x_{M1(1)} = \frac{S_V}{i_z \cdot S_{M1}} = \frac{200}{5 \cdot 0,5} = j80$$

$$x_{M2(1)} = \frac{S_V}{i_z \cdot S_{M1}} = \frac{200}{7 \cdot 0,5} = j57,1428$$

$$x_{M3(1)} = \frac{S_V}{i_z \cdot S_{M1}} = \frac{200}{7 \cdot 0,5} = j57,1428$$



**Reaktance generátoru:**

$$x_{Ga(1)} = \frac{x_d'' \cdot S_V}{100 \cdot S_G} = \frac{10 \cdot 200}{100 \cdot 80} = j0,25$$

Protože jsou zapojeny 3 generátory G paralelně tak výsledná reaktance  $x_{G(1)}$  bude rovna:

$$x_{G(1)} = \frac{1}{\frac{1}{x_{Ga(1)}} + \frac{1}{x_{Ga(1)}} + \frac{1}{x_{Ga(1)}}} = \frac{1}{\frac{1}{j0,25} + \frac{1}{j0,25} + \frac{1}{j0,25}} = j0,0833$$

**Reaktance reaktorů:**

$$x_{R1(1)} = \frac{u_k \cdot S_V}{100 \cdot S_{R1}} = \frac{10 \cdot 200}{100 \cdot 10,4} = j1,9231$$

$$x_{R2(1)} = \frac{u_k \cdot S_V}{100 \cdot S_{R2}} = \frac{10,5 \cdot 200}{100 \cdot 16,6} = j1,2651$$

**Reaktance soustavy:**

$$z_{S(1)} = \frac{c \cdot S_V}{S_k} = \frac{1,10 \cdot 200}{200} = j1,1$$

**Vypočtené hodnoty sousledných reaktancí:**

*Tab. 7 Hodnoty reaktancí pro transformátory*

T	X <sub>T</sub>
X <sub>T1(1)</sub>	j2,4
X <sub>T2(1)</sub>	j7,5
X <sub>T3(1)</sub>	j0,245
X <sub>T4(1)</sub>	j1,2
X <sub>T5(1)</sub>	j0,1111
X <sub>T6(1)</sub>	j7,5
X <sub>T7(1)</sub>	j9,6
X <sub>T8(1)</sub>	j12
X <sub>T9(1)</sub>	j12
X <sub>T10(1)</sub>	j12

*Tab. 8 Hodnoty reaktancí a odporů pro vedení*

V	R <sub>V</sub>	X <sub>V</sub>
Z <sub>V1(1)</sub>	0,0802	j0,0376
Z <sub>V2(1)</sub>	0,1603	j0,0752
Z <sub>V3(1)</sub>	149,375	j48,75
Z <sub>V4(1)</sub>	0,0165	j0,0344
Z <sub>V5(1)</sub>	0,0165	j0,0344
Z <sub>V6(1)</sub>	0,0865	j0,0281

Tab. 9 Hodnoty reaktancí asynchronních motorů

M	X
$x_{M1(1)}$	j80
$x_{M2(1)}$	j57,1428
$x_{M3(1)}$	j57,1428

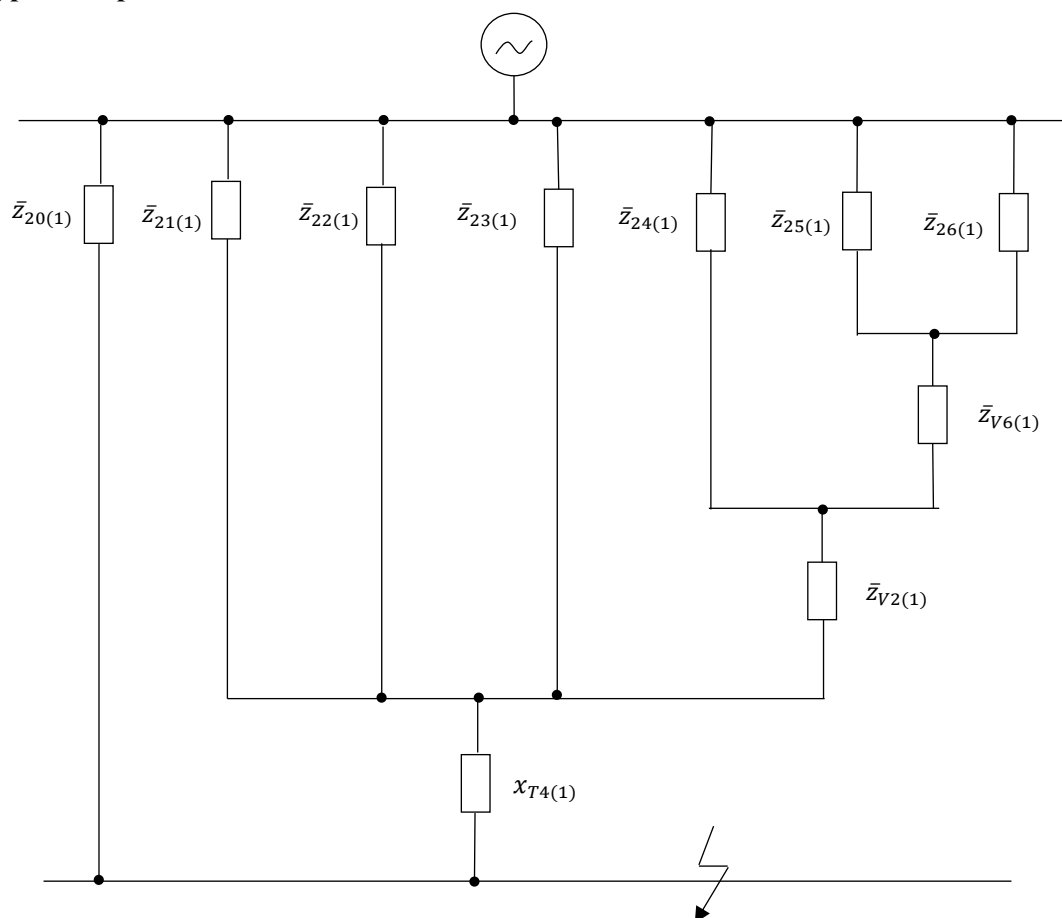
Tab. 10 Hodnoty reaktancí reaktorů

R	X
$x_{R1(1)}$	j1,9231
$x_{R2(1)}$	j1,2651

Tab. 11 Hodnoty reaktancí generátoru a soustavy

G a $S_k$	X
$x_{G(1)}$	j0,0833
$x_{Sk(1)}$	j1,1

**Výpočet impedance zkratového obvodu v bodě 1.**



Obr. 17 Zjednodušené náhradní schéma

$$\bar{z}_{20(1)} = x_{G(1)} + x_{T5(1)} + \bar{z}_{V5(1)} = j0,0833 + j0,1111 + 0,0165 + j0,0344 \\ = 0,0165 + j0,2288$$

$$\bar{z}_{21(1)} = x_{M2(1)} + \bar{z}_{V3(1)} + x_{T2(1)} = j57,1428 + 74,6875 + j24,375 + j7,5 \\ = 74,6875 + j89,0178$$

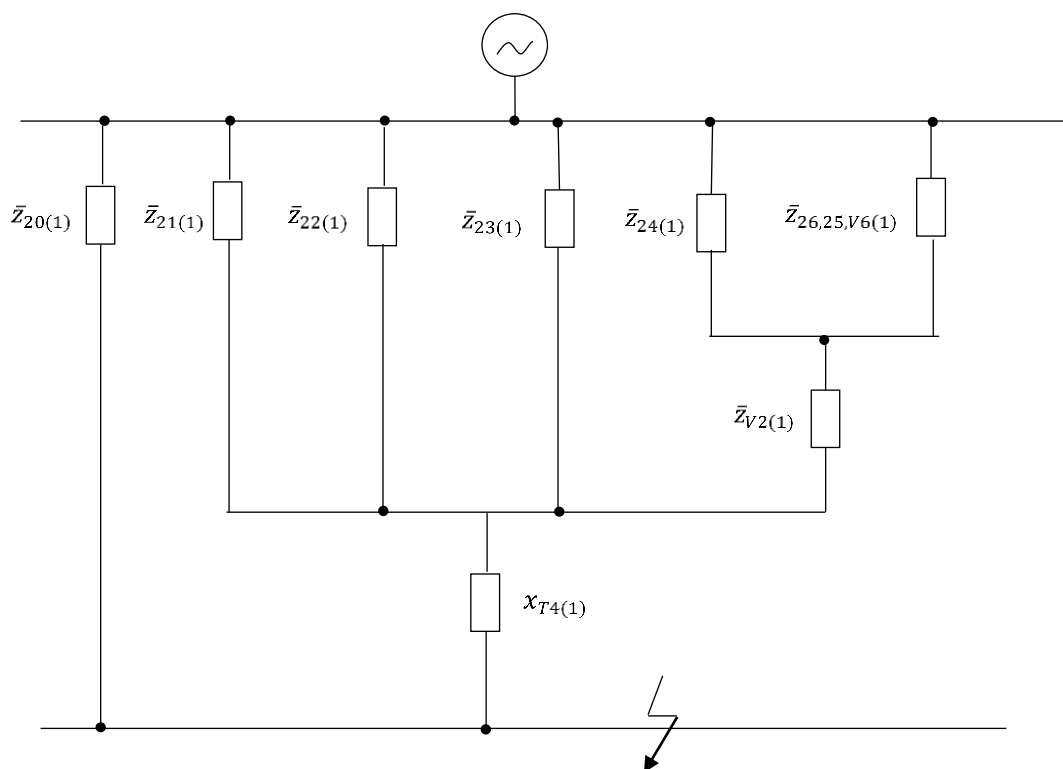
$$\bar{z}_{22(1)} = x_{Sk(1)} + \bar{z}_{V4(1)} + x_{T3(1)} = j1,1 + 0,0165 + j0,0344 + j0,245 = 0,0165 + j1,3794$$

$$\bar{z}_{23(1)} = x_{R2(1)} + x_{T10(1)} + x_{T6(1)} = j1,2651 + j12 + j7,5 = 0 + j20,7651$$

$$\bar{z}_{24(1)} = x_{M1(1)} + \bar{z}_{V1(1)} + x_{T1(1)} = j80 + 0,0802 + j0,0376 + j2,4 = 0,0802 + j82,4376$$

$$\bar{z}_{25(1)} = x_{M3(1)} + x_{T8(1)} = j57,1428 + j12 = 0 + j69,1428$$

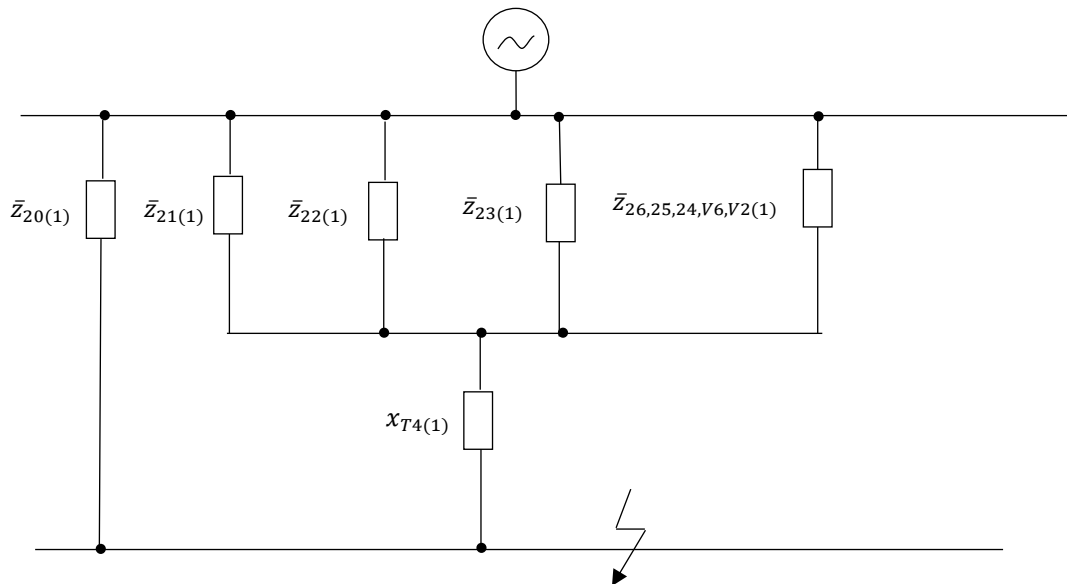
$$\bar{z}_{26(1)} = x_{R1(1)} + x_{T9(1)} + x_{T7(1)} = j1,9231 + j12 + j9,6 = 0 + j23,5231$$



Obr. 18 Následné zjednodušené náhradní schéma

$$\bar{z}_{26,25,V6(1)} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{z}_{25(1)}} + \frac{1}{\bar{z}_{26(1)}}} + \bar{z}_{V6(1)} = \frac{1}{\frac{1}{j69,1428} + \frac{1}{j23,5231}} + 0,0865 + j0,0281$$

$$= 0,0865 + j17,5798$$

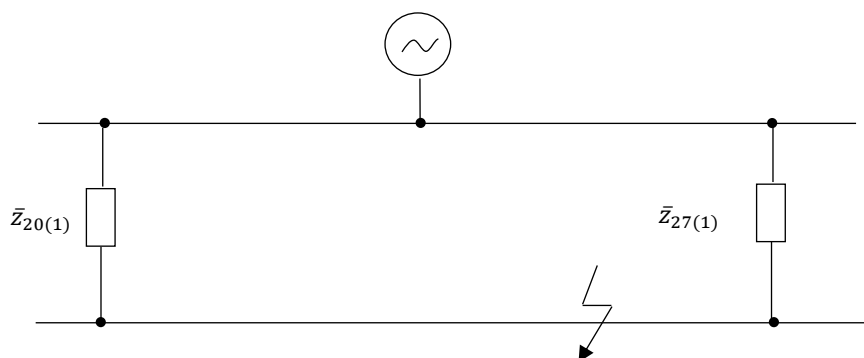


Obr. 19 Následné zjednodušené náhradní schéma

$$\bar{z}_{26,25,24,V6,V2(1)} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{z}_{26,25,V6(1)}} + \frac{1}{\bar{z}_{24(1)}}} + \bar{z}_{V2(1)}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{0,0865 + j17,5798} + \frac{1}{0,0802 + j82,4376}} + 0,0802 + j0,0376$$

$$= 0,1414 + j14,5275$$



Obr. 20 Úplné zjednodušené náhradní schéma

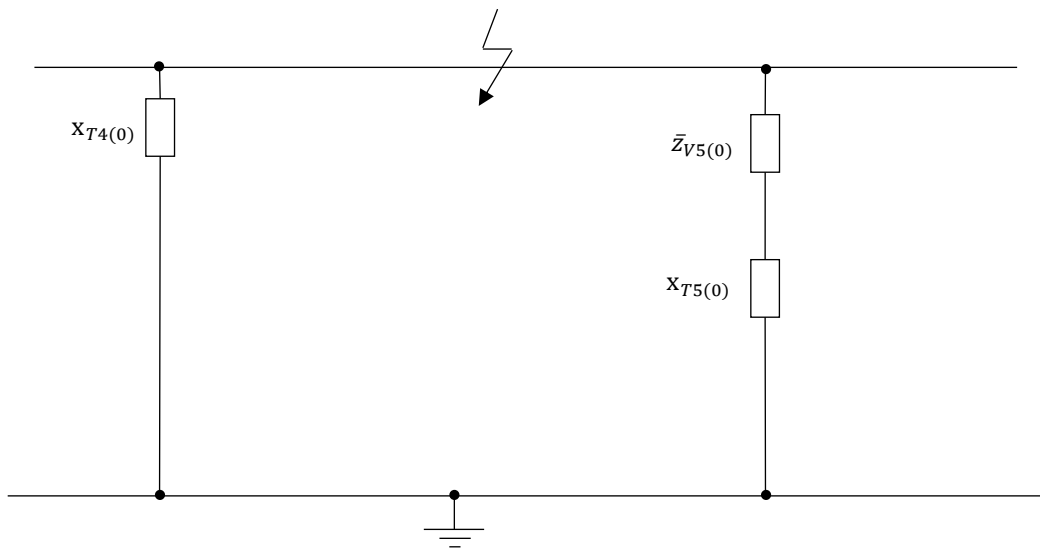
$$\begin{aligned}\bar{z}_{27(1)} &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{z}_{26,25,24,V6,V2(1)}} + \frac{1}{\bar{z}_{23(1)}} + \frac{1}{\bar{z}_{22(1)}} + \frac{1}{\bar{z}_{21(1)}}} + \bar{z}_{T4(1)} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{0,1414 + j14,5275} + \frac{1}{j20,7651} + \frac{1}{0,0165 + j1,3794} + \frac{1}{74,6875 + j89,0178}} + j1,2 = 0,0207 + j2,3783\end{aligned}$$

**Celková impedance zkratového obvodu pro sousledné složky:**

$$\bar{z}_{(1)} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{z}_{27(1)}} + \frac{1}{\bar{z}_{20(1)}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,0207 + j2,3783} + \frac{1}{0,0165 + j0,2288}} = 0,0139 + j0,2088$$

$$|\bar{z}_{(1)}| = \sqrt{Re^2 + Im^2} = \sqrt{0,0139^2 + 0,2088^2} = 0,2093 \Omega$$

**Výpočet impedance pro nulové složky:**



*Obr. 21 Náhradní schéma pro nulové složky*

**Výpočet netočivých impedancí:**

$$x_{T4(0)} = 0,85 \cdot x_{T4(1)} = 0,85 \cdot j1,2 = j1,02$$

$$x_{T5(0)} = 0,85 \cdot x_{T5(1)} = 0,85 \cdot j0,1111 = j0,0944$$

$$\bar{z}_{V5(0)} = r_{V5(1)} + 2 \cdot x_{V5(1)} = 0,0165 + 2 \cdot j0,0344 = 0,0165 + j0,0688$$

**Celková impedance zkratového obvodu pro netočivé složky:**

$$\bar{z}_{(0)} = \frac{1}{\frac{1}{x_{T4(0)}} + \frac{1}{\bar{z}_{V5(0)} + x_{T5(0)}}} = \frac{1}{\frac{1}{j1,02} + \frac{1}{0,0165 + j0,0688 + j0,0944}} = 0,0165 + j0,1633$$

$$|\bar{z}_{(0)}| = \sqrt{Re^2 + Im^2} = \sqrt{0,0165^2 + 0,1633^2} = 0,1415 \Omega$$

**Vztažný proud:**

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 110} = 1,0497 \text{ kA}$$

**Třífázový zkratový proud:**

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot I_V}{|\bar{z}_{(1)}|} = \frac{1,10 \cdot 1,0497}{0,2093} = 5,516 \text{ kA}$$

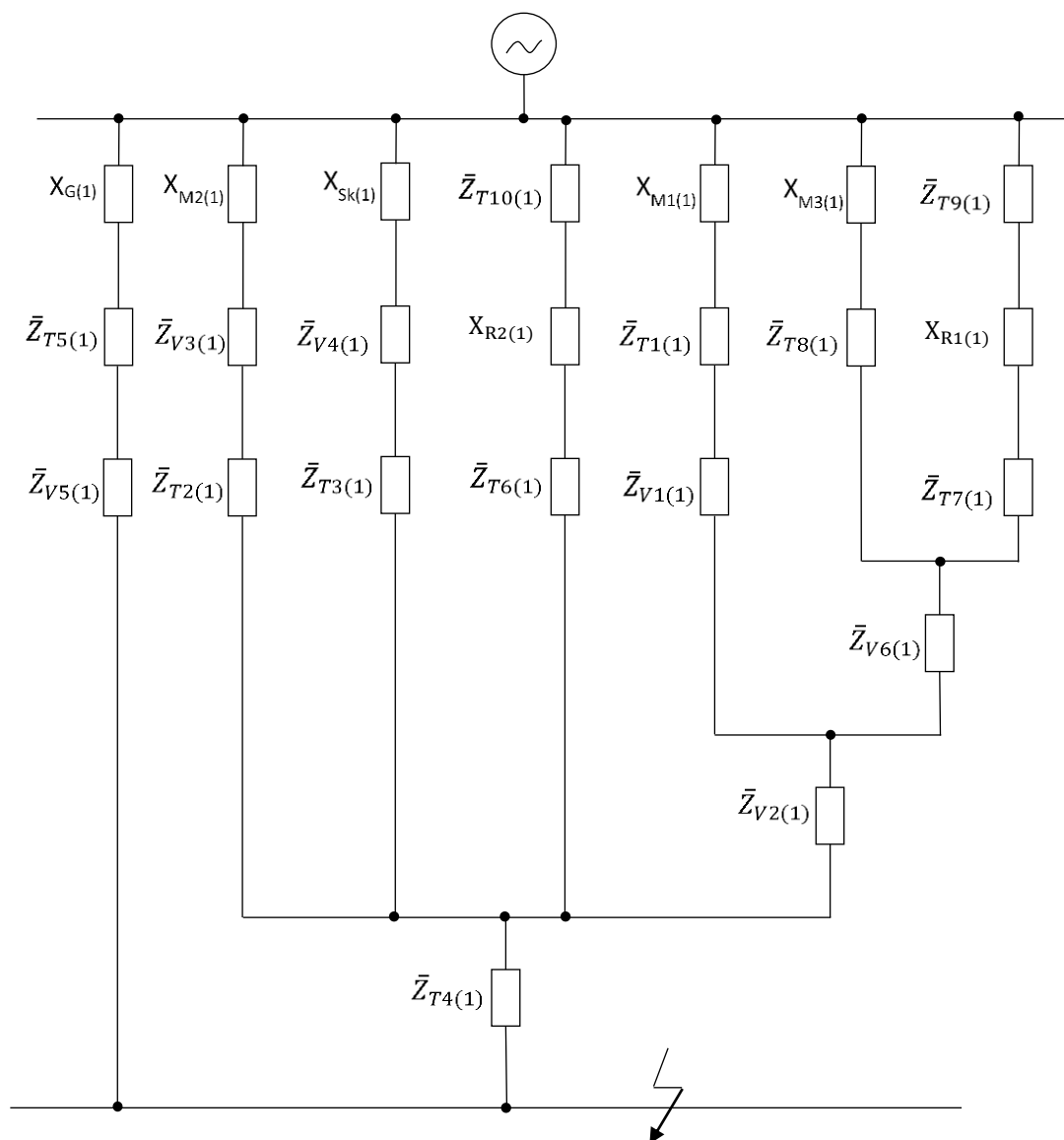
**Dvoufázový zkratový proud:**

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot I_V}{2 \cdot |\bar{z}_{(1)}|} = \frac{1,10 \cdot \sqrt{3} \cdot 1,0497}{2 \cdot 0,2093} = 4,777 \text{ kA}$$

**Jednofázový zkratový proud:**

$$I_{k1}'' = \frac{c \cdot 3 \cdot I_V}{2 \cdot |\bar{z}_{(1)}| + |\bar{z}_{(0)}|} = \frac{1,10 \cdot 3 \cdot 1,0497}{2 \cdot 0,2093 + 0,1415} = 6,185 \text{ kA}$$

### 6.1.2. Výpočet počátečního zkratového proudu v fyzikálních jednotkách



Obr. 22 Náhradní schéma zkratového obvodu

#### Parametry prvků

Parametry jednotlivých prvků jsou uvedeny v Tab. 2, Tab. 3, Tab. 4, Tab. 5 a Tab. 6.

### Výpočet sousledných impedancí:

#### **Impedance transformátorů:**

##### Transformátor $T_1$

$$Z_{T1(1)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{u_k \cdot U_{T1}^2}{100 \cdot S_{T1}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{6 \cdot 22^2}{100 \cdot 2,5} = 5,808 \, \Omega$$

$$R_{T1(1)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{kT1} \cdot U_{T1}^2}{S_{T1}^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,029 \cdot 22^2}{2,5^2} = 1,1229 \, \Omega$$

$$X_{T1(1)} = \sqrt{Z_{T1(1)}^2 - R_{T1(1)}^2} = \sqrt{5,808^2 - 1,1229^2} = j5,6984 \, \Omega$$

##### Transformátor $T_2$

$$Z_{T2(1)} = \frac{u_k \cdot U_{T2}^2}{100 \cdot S_{T2}} = \frac{6 \cdot 22^2}{100 \cdot 1,6} = 18,15 \, \Omega$$

$$R_{T2(1)} = \frac{P_{kT2} \cdot U_{T2}^2}{S_{T2}^2} = \frac{0,02 \cdot 22^2}{1,6^2} = 3,7812 \, \Omega$$

$$X_{T2(1)} = \sqrt{Z_{T2(1)}^2 - R_{T2(1)}^2} = \sqrt{18,15^2 - 3,7812^2} = j17,7517 \, \Omega$$

##### Transformátor $T_3$

$$Z_{T3(1)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{u_k \cdot U_{T3}^2}{100 \cdot S_{T3}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{9,8 \cdot 22^2}{100 \cdot 40} = 0,5929 \, \Omega$$

$$R_{T3(1)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{kT3} \cdot U_{T3}^2}{S_{T3}^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,086 \cdot 22^2}{40^2} = 0,013 \, \Omega$$

$$X_{T3(1)} = \sqrt{Z_{T3(1)}^2 - R_{T3(1)}^2} = \sqrt{0,5929^2 - 0,013^2} = j0,5927 \, \Omega$$

##### Transformátor $T_4$

$$Z_{T4(1)} = \frac{u_k \cdot U_{T4}^2}{100 \cdot S_{T4}} = \frac{9,6 \cdot 22^2}{100 \cdot 16} = 2,904 \, \Omega$$

$$R_{T4(1)} = \frac{P_{kT4} \cdot U_{T4}^2}{S_{T4}^2} = \frac{0,051 \cdot 22^2}{16^2} = 0,0964 \, \Omega$$

$$X_{T4(1)} = \sqrt{Z_{T4(1)}^2 - R_{T4(1)}^2} = \sqrt{2,904^2 - 0,0964^2} = j2,9024 \, \Omega$$



Transformátor  $T_5$

$$Z_{T5a(1)} = \frac{u_k \cdot U_{T5}^2}{100 \cdot S_{T5}} = \frac{10,5 \cdot 110^2}{100 \cdot 63} = 20,1667 \Omega$$

$$R_{T5a(1)} = \frac{P_{kT5} \cdot U_{T5}^2}{S_{T5}^2} = \frac{0,133 \cdot 110^2}{63^2} = 0,4055 \Omega$$

$$X_{T5a(1)} = \sqrt{Z_{T5a(1)}^2 - R_{T5a(1)}^2} = \sqrt{20,1667^2 - 0,4055^2} = j20,1626 \Omega$$

Protože jsou zapojeny 3 transformátory  $T_5$  paralelně tak výsledná impedance  $Z_{T5(1)}$  bude rovna:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{T5(1)} &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{T5a(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{T5a(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{T5a(1)}}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{0,4055 + j20,1626} + \frac{1}{0,4055 + j20,1626} + \frac{1}{0,4055 + j20,1626}} \\ &= 0,1352 + j6,7209 \Omega\end{aligned}$$

Transformátor  $T_6$

$$Z_{T6(1)} = \frac{u_k \cdot U_{T6}^2}{100 \cdot S_{T6}} = \frac{6 \cdot 22^2}{100 \cdot 1,6} = 18,15 \Omega$$

$$R_{T6(1)} = \frac{P_{kT6} \cdot U_{T6}^2}{S_{T6}^2} = \frac{0,0215 \cdot 22^2}{1,6^2} = 4,0648 \Omega$$

$$X_{T6(1)} = \sqrt{Z_{T6(1)}^2 - R_{T6(1)}^2} = \sqrt{18,15^2 - 4,0648^2} = j17,6889 \Omega$$

Transformátor  $T_7$

$$Z_{T7(1)} = \frac{u_k \cdot U_{T7}^2}{100 \cdot S_{T7}} = \frac{6 \cdot 22^2}{100 \cdot 1,25} = 23,232 \Omega$$

$$R_{T7(1)} = \frac{P_{kT7} \cdot U_{T7}^2}{S_{T7}^2} = \frac{0,0175 \cdot 22^2}{1,25^2} = 5,4208 \Omega$$

$$X_{T7(1)} = \sqrt{Z_{T7(1)}^2 - R_{T7(1)}^2} = \sqrt{23,232^2 - 5,4208^2} = j22,5907 \Omega$$

Transformátor  $T_8$

$$Z_{T8(1)} = \frac{u_k \cdot U_{T8}^2}{100 \cdot S_{T8}} = \frac{6 \cdot 22^2}{100 \cdot 1} = 29,04 \, \Omega$$

$$R_{T8(1)} = \frac{P_{kT8} \cdot U_{T8}^2}{S_{T8}^2} = \frac{0,015 \cdot 22^2}{1^2} = 7,26 \, \Omega$$

$$X_{T8(1)} = \sqrt{Z_{T8(1)}^2 - R_{T8(1)}^2} = \sqrt{29,04^2 - 7,26^2} = j28,1179 \, \Omega$$

Transformátor  $T_9$

$$Z_{T9(1)} = \frac{u_k \cdot U_{T9}^2}{100 \cdot S_{T9}} = \frac{6 \cdot 0,4^2}{100 \cdot 1} = 2,16 \, \Omega$$

$$R_{T9(1)} = \frac{P_{kT9} \cdot U_{T9}^2}{S_{T9}^2} = \frac{0,015 \cdot 0,4^2}{1^2} = 0,54 \, \Omega$$

$$X_{T9(1)} = \sqrt{Z_{T9(1)}^2 - R_{T9(1)}^2} = \sqrt{2,16^2 - 0,54^2} = j2,0914 \, \Omega$$

Transformátor  $T_{10}$

$$Z_{T10(1)} = \frac{u_k \cdot U_{T10}^2}{100 \cdot S_{T10}} = \frac{6 \cdot 0,4^2}{100 \cdot 1} = 2,16 \, \Omega$$

$$R_{T10(1)} = \frac{P_{kT10} \cdot U_{T10}^2}{S_{T10}^2} = \frac{0,015 \cdot 0,4^2}{1^2} = 0,54 \, \Omega$$

$$X_{T10(1)} = \sqrt{Z_{T10(1)}^2 - R_{T10(1)}^2} = \sqrt{2,16^2 - 0,54^2} = j2,0914 \, \Omega$$

**Impedance vedení:**

Vedení  $V_1$

$$X_{V1(1)} = X_k \cdot l = 0,091 \cdot 1 = j0,091 \, \Omega$$

$$R_{V1(1)} = R_k \cdot l = 0,194 \cdot 1 = 0,194 \, \Omega$$

$$\bar{Z}_{V1(1)} = R_{V1(1)} + X_{V1(1)} = (0,194 + j0,091) \, \Omega$$

Vedení  $V_2$

$$X_{V2(1)} = \frac{1}{2} \cdot X_k \cdot l = \frac{1}{2} \cdot 0,091 \cdot 2 = j0,091 \, \Omega$$

$$R_{V2(1)} = \frac{1}{2} \cdot R_k \cdot l = \frac{1}{2} \cdot 0,194 \cdot 2 = 0,194 \, \Omega$$

$$\bar{Z}_{V2(1)} = R_{V2(1)} + X_{V2(1)} = (0,194 + j0,091) \, \Omega$$

#### Vedení $V_3$

$$X_{V3(1)} = \frac{1}{2} \cdot X_k \cdot l = \frac{1}{2} \cdot 0,078 \cdot 0,5 = j0,0195 \Omega$$

$$R_{V3(1)} = \frac{1}{2} \cdot R_k \cdot l = \frac{1}{2} \cdot 0,239 \cdot 0,5 = 0,0598 \Omega$$

$$\bar{Z}_{V3(1)} = R_{V3(1)} + X_{V3(1)} = (0,0598 + j0,0195) \Omega$$

#### Vedení $V_4$

$$X_{V4(1)} = X_k \cdot l = 0,4165 \cdot 5 = j2,0825 \Omega$$

$$R_{V4(1)} = R_k \cdot l = 0,2 \cdot 5 = 1 \Omega$$

$$\bar{Z}_{V4(1)} = R_{V4(1)} + X_{V4(1)} = (1 + j2,0825) \Omega$$

#### Vedení $V_5$

$$X_{V5(1)} = X_k \cdot l = 0,4165 \cdot 5 = j2,0825 \Omega$$

$$R_{V5(1)} = R_k \cdot l = 0,2 \cdot 5 = 1 \Omega$$

$$\bar{Z}_{V5(1)} = R_{V5(1)} + X_{V5(1)} = (1 + j2,0825) \Omega$$

#### Vedení $V_6$

$$X_{V6(1)} = X_k \cdot l = 0,097 \cdot 0,7 = j0,0679 \Omega$$

$$R_{V6(1)} = R_k \cdot l = 0,299 \cdot 0,7 = 0,2093 \Omega$$

$$\bar{Z}_{V6(1)} = R_{V6(1)} + X_{V6(1)} = (0,0679 + j0,2093) \Omega$$

#### **Reaktance Asynchronních motorů:**

$$X_{M1(1)} = \frac{U_{M1}^2}{i_z \cdot S_{M1}} = \frac{0,4^2}{5 \cdot 0,5} = j0,064 \Omega$$

$$X_{M2(1)} = \frac{U_{M2}^2}{i_z \cdot S_{M2}} = \frac{0,4^2}{7 \cdot 0,5} = j0,0457 \Omega$$

$$X_{M3(1)} = \frac{U_{M3}^2}{i_z \cdot S_{M3}} = \frac{0,4^2}{7 \cdot 0,5} = j0,0457 \Omega$$

#### **Reaktance generátoru:**

$$X_{Ga(1)} = \frac{x_d'' \cdot U_G^2}{100 \cdot S_G} = \frac{10 \cdot 110^2}{100 \cdot 80} = j15,125 \Omega$$

Protože jsou zapojeny 3 generátory G paralelně tak výsledná reaktance  $X_{G(1)}$  bude rovna:

$$X_{G(1)} = \frac{1}{\frac{1}{X_{Ga(1)}} + \frac{1}{X_{Ga(1)}} + \frac{1}{X_{Ga(1)}}} = \frac{1}{\frac{1}{j15,125} + \frac{1}{j15,125} + \frac{1}{j15,125}} = j5,0417 \, \Omega$$

**Reaktance reaktorů:**

$$X_{R1(1)} = \frac{10 \cdot u_R \cdot U_{R1}}{\sqrt{3} \cdot I_{R1}} = \frac{10 \cdot 10 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1000} = j0,3464 \, \Omega$$

$$X_{R2(1)} = \frac{10 \cdot u_R \cdot U_{R2}}{\sqrt{3} \cdot I_{R2}} = \frac{10 \cdot 10,5 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1600} = j0,2273 \, \Omega$$

**Reaktance soustavy:**

$$X_{Sk(1)} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 110^3}{200} = j66,55 \, \Omega$$

### Vypočtené hodnoty sousledných impedancí ve fyzikálních veličinách

Tab. 12 Hodnoty sousledných impedancí pro transformátory

T	$Z_T (\Omega)$
$Z_{T1(1)}$	1,1229+j5,6984
$Z_{T2(1)}$	3,7812+j17,7517
$Z_{T3(1)}$	0,013+j0,5927
$Z_{T4(1)}$	0,0964+j2,9024
$Z_{T5(1)}$	0,1352+j6,7209
$Z_{T6(1)}$	4,0648+j17,6889
$Z_{T7(1)}$	5,4208+j22,5907
$Z_{T8(1)}$	7,26+j28,1179
$Z_{T9(1)}$	0,54+j2,0914
$Z_{T10(1)}$	0,54+j2,0914

Tab. 13 Hodnoty sousledných impedancí pro vedení

V	$Z_V (\Omega)$
$Z_{V1(1)}$	0,194+j0,091
$Z_{V2(1)}$	0,194+j0,091
$Z_{V3(1)}$	0,0598+j0,0195
$Z_{V4(1)}$	1+j2,0825
$Z_{V5(1)}$	1+j2,0825
$Z_{V6(1)}$	0,0679+j0,2093

Tab. 14 Hodnoty sousledných reaktancí pro asynchronní motor

M	$X_M (\Omega)$
$X_{M1(1)}$	j0,064
$X_{M2(1)}$	j0,0457
$X_{M3(1)}$	j0,0457

Tab. 15 Hodnoty sousledných reaktancí pro reaktory

R	$X_R (\Omega)$
$X_{R1(1)}$	j0,3464
$X_{R2(1)}$	j0,2273

Tab. 16 Hodnoty sousledných reaktancí pro generátor a soustavu

G a $S_k$	$X_G \text{ a } X_{Sk} (\Omega)$
$X_{G(1)}$	j5,0417
$X_{Sk(1)}$	j66,55

### Přepočet parametrů prvků na napět'ovou hladinu 110 kV

První zkrat se nachází v napět'ové hladině 110 kV, proto je nutné všechny parametry prvků přepočítat na napět'ovou hladinu 110 kV.

#### **Transformátory:**

$$\bar{Z}_{T1(1)110kV} = \bar{Z}_{T1(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = (1,1229 + j5,6984) \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 28,072 + j142,4605 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T2(1)110kV} = \bar{Z}_{T2(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = (3,7812 + j17,7518) \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 94,5312 + j443,7938 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T3(1)110kV} = \bar{Z}_{T3(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = (0,013 + j0,5927) \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 0,3252 + j14,8189 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T4(1)110kV} = \bar{Z}_{T4(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = (0,0964 + j2,9024) \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 2,4105 + j72,5599 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T5(1)110kV} = \bar{Z}_{T5(1)} = 0,1352 + j6,7209 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T6(1)110kV} = \bar{Z}_{T6(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = (4,0648 + j17,6889) \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 101,6211 + j442,2242 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T7(1)110kV} = \bar{Z}_{T7(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = (5,4208 + j22,5907) \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 135,52 + j564,7681 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T8(1)110kV} = \bar{Z}_{T8(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = (7,26 + j28,1179) \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 181,5 + j702,9464 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T9(1)110kV} = \bar{Z}_{T9(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = (0,54 + j2,0914) \cdot \left(\frac{110}{0,4}\right)^2 = 181,5 + j702,9464 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T10(1)110kV} = \bar{Z}_{T10(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = (0,54 + j2,0914) \cdot \left(\frac{110}{0,4}\right)^2 = 181,5 + j702,9464 \Omega$$

**Vedení:**

$$\bar{Z}_{V1(1)110kV} = \bar{Z}_{V1(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = (0,194 + j0,091) \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 4,85 + j2,275 \Omega$$

$$\bar{Z}_{V2(1)110kV} = \bar{Z}_{V2(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = (0,194 + j0,091) \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 4,85 + j2,275 \Omega$$

$$\bar{Z}_{V3(1)110kV} = \bar{Z}_{V3(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = (0,0598 + j0,0195) \cdot \left(\frac{110}{0,4}\right)^2 = 4518,5938 + j1474,6875 \Omega$$

$$\bar{Z}_{V4(1)110kV} = \bar{Z}_{V4(1)} = 1 + j2,0825 \Omega$$

$$\bar{Z}_{V5(1)110kV} = \bar{Z}_{V5(1)} = 1 + j2,0825 \Omega$$

$$\bar{Z}_{V6(1)110kV} = \bar{Z}_{V6(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = (0,2093 + j0,0679) \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 5,2325 + j1,6975 \Omega$$

**Asynchronní motory:**

$$X_{M1(1)110kV} = X_{M1(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = j0,064 \cdot \left(\frac{110}{0,4}\right)^2 = j4840 \Omega$$

$$X_{M2(1)110kV} = X_{M2(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = j0,0457 \cdot \left(\frac{110}{0,4}\right)^2 = j3457,1428 \Omega$$

$$X_{M3(1)110kV} = X_{M3(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = j0,0457 \cdot \left(\frac{110}{0,4}\right)^2 = j3457,1428 \Omega$$

**Generátor:**

$$X_{G(1)110kV} = X_{G(1)} = j5,0417 \Omega$$

**Reaktory:**

$$X_{R1(1)110kV} = X_{R1(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = j0,3464 \cdot \left(\frac{110}{6}\right)^2 = j116,4323 \Omega$$

$$X_{R2(1)110kV} = X_{R2(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = j0,2273 \cdot \left(\frac{110}{6}\right)^2 = j76,4087 \Omega$$

**Soustava:**

$$X_{Sk(1)110kV} = X_{Sk(1)} = j66,55 \, \Omega$$

**Vypočtené parametry přepočtené na napětíovou hladinu 110 kV**

*Tab. 17 Hodnoty sousledných impedancí pro transformátory přepočtených na hladinu 110 kV*

T	$Z_T (\Omega)$
$Z_{T1(1)110kV}$	28,072+j142,4605
$Z_{T2(1)110kV}$	94,5312+j443,7938
$Z_{T3(1)110kV}$	0,3252+j14,8189
$Z_{T4(1)110kV}$	2,4105+j72,5599
$Z_{T5(1)110kV}$	0,1352+j6,7209
$Z_{T6(1)110kV}$	101,6211+j442,2242
$Z_{T7(1)110kV}$	135,52+j564,7681
$Z_{T8(1)110kV}$	181,5+j702,9464
$Z_{T9(1)110kV}$	181,5+j702,9464
$Z_{T10(1)110kV}$	181,5+j702,9464

*Tab. 18 Hodnoty sousledných impedancí pro vedení přepočtených na hladinu 110 kV*

V	$Z_V (\Omega)$
$Z_{V1(1)110kV}$	4,85+j2,275
$Z_{V2(1)110kV}$	4,85+j2,275
$Z_{V3(1)110kV}$	4518,5938+j1474,6875
$Z_{V4(1)110kV}$	1+j2,0825
$Z_{V5(1)110kV}$	1+j2,0825
$Z_{V6(1)110kV}$	5,2325+j1,6975

*Tab. 19 Hodnoty sousledných reaktancí asynchronních motorů přepočtených na hladinu 110 kV*

M	$X_M (\Omega)$
$X_{M1(1)110kV}$	j4840
$X_{M2(1)110kV}$	j3457,1428
$X_{M3(1)110kV}$	j3457,1428

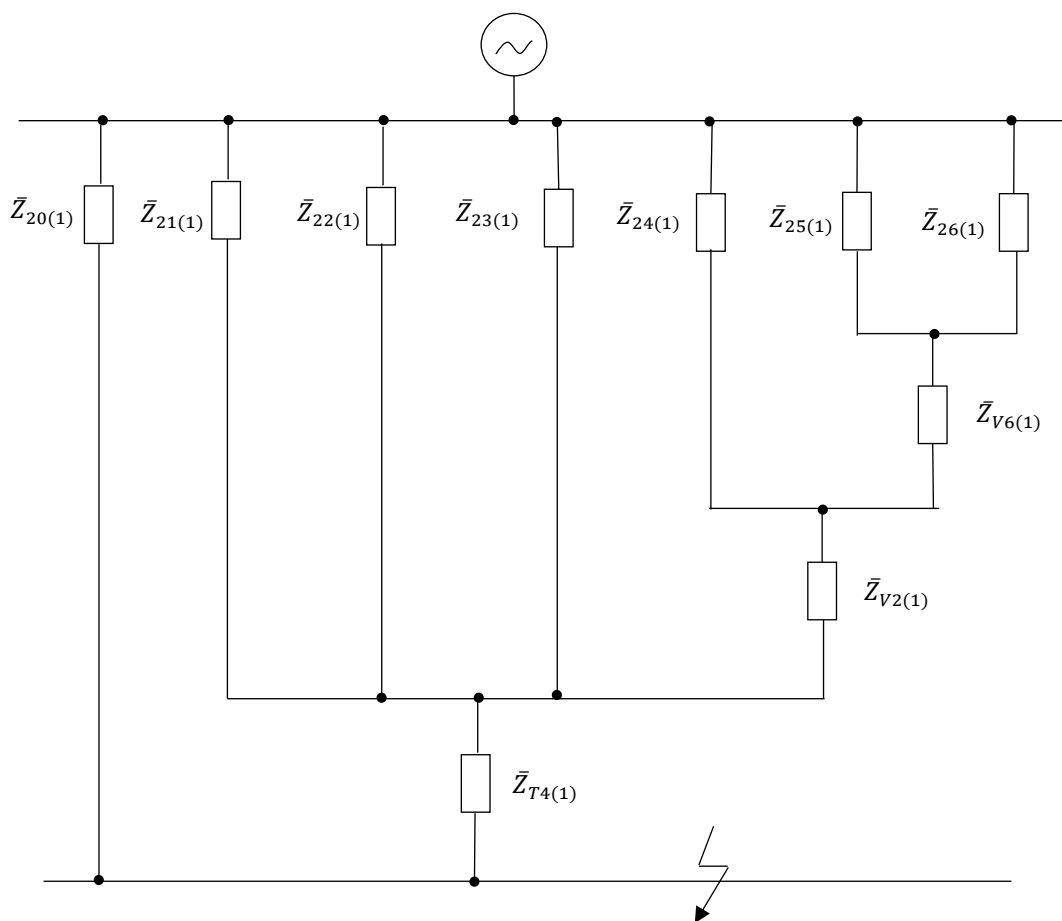
*Tab. 20 Hodnoty sousledných reaktancí reaktorů přepočtených na hladinu 110 kV*

R	$X_R (\Omega)$
$X_{R1(1)110kV}$	j116,4323
$X_{R2(1)110kV}$	j76,4087

*Tab. 21 Hodnoty sousledných reaktancí generátoru a soustavě přepočtených na hladinu 110 kV*

G a $S_k$	$X_G$ a $X_{Sk} (\Omega)$
$X_{G(1)110kV}$	j5,0417
$X_{Sk(1)110kV}$	j66,55

## Výpočet impedance zkratového obvodu



Obr. 23 Zjednodušené náhradní schéma zkratového obvodu

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{20(1)} &= X_{G(1)110kV} + \bar{Z}_{T5(1)110kV} + \bar{Z}_{V5(1)110kV} \\ &= j5,0417 + 0,1352 + j6,7209 + 1 + j2,0825 = 1,1352 + j13,845 \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{21(1)} &= X_{M2(1)110kV} + \bar{Z}_{V3(1)110kV} + \bar{Z}_{T2(1)110kV} \\ &= j3457,1428 + 4518,5938 + j1474,6875 + 94,5312 + j443,7938 \\ &= 4613,125 + j5375,6241 \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{22(1)} &= X_{Sk(1)110kV} + \bar{Z}_{V4(1)110kV} + \bar{Z}_{T3(1)110kV} \\ &= j66,55 + 1 + j2,0825 + 0,3252 + j14,8189 = 1,3252 + j83,4514 \Omega\end{aligned}$$

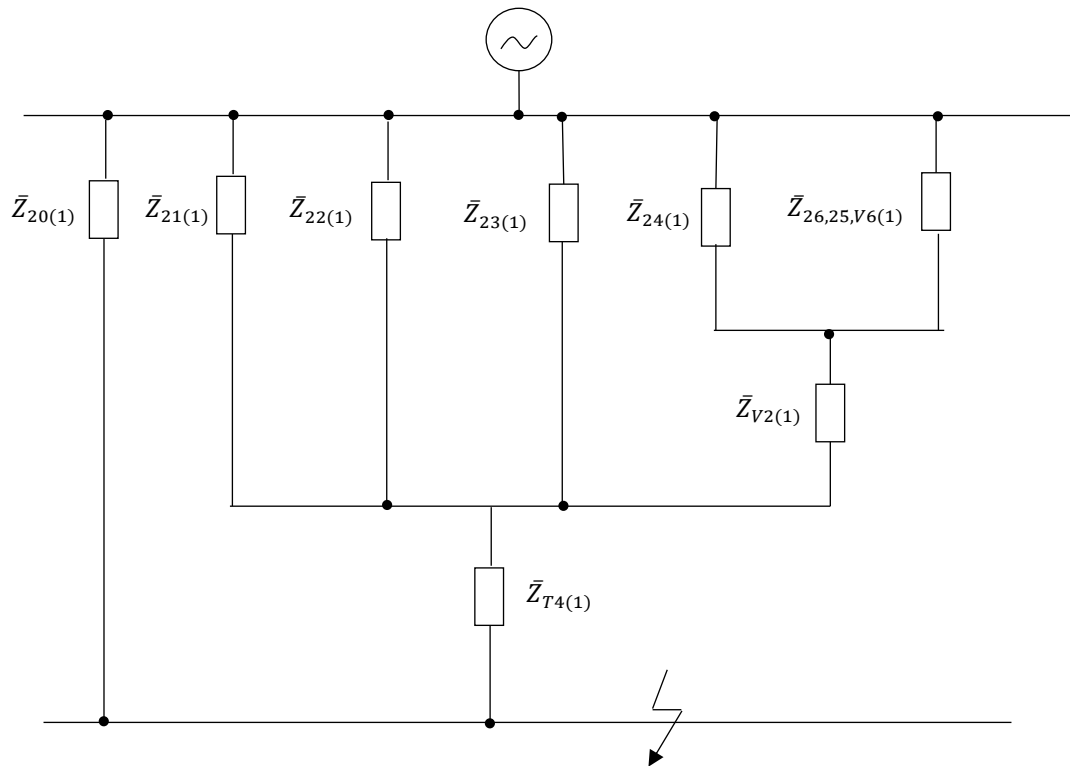
$$\begin{aligned}\bar{Z}_{23(1)} &= X_{R2(1)110kV} + \bar{Z}_{T10(1)110kV} + \bar{Z}_{T6(1)110kV} \\ &= j76,4087 + 181,5 + j702,9465 + 101,6211 + j442,2242 \\ &= 283,1211 + j1221,5794 \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{24(1)} &= X_{M1(1)110kV} + \bar{Z}_{V1(1)110kV} + \bar{Z}_{T1(1)110kV} \\ &= j4840 + 4,85 + j2,275 + 28,072 + j142,4605 = 32,922 + j4984,7355 \Omega\end{aligned}$$



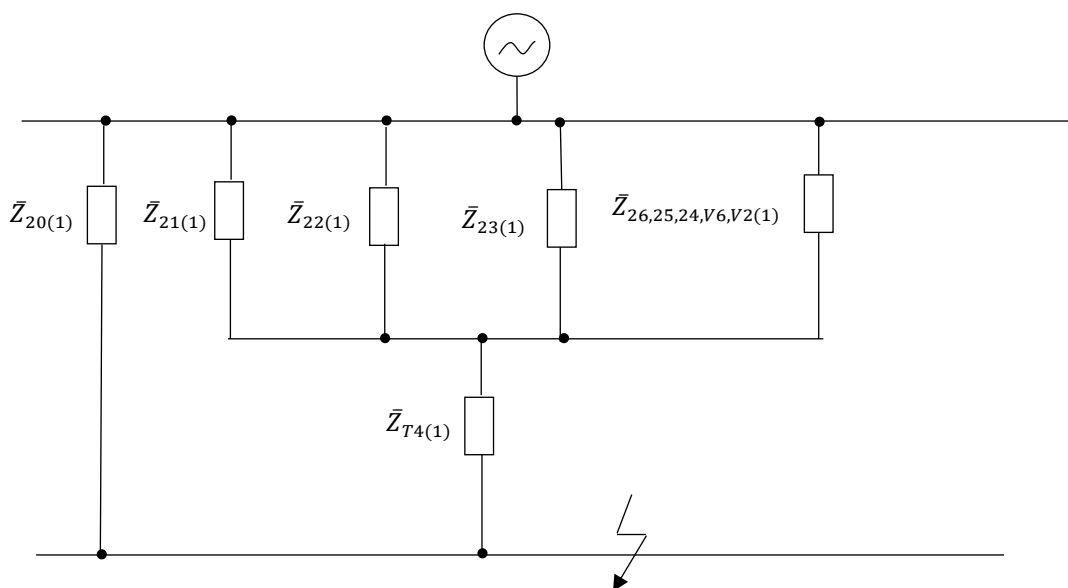
$$\begin{aligned}\bar{Z}_{25(1)} &= X_{M3(1)110kV} + \bar{Z}_{T8(1)110kV} = j3457,1428 + 181,5 + j702,9465 \\ &= 181,5 + j4160,0893 \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{26(1)} &= X_{R1(1)110kV} + \bar{Z}_{T9(1)110kV} + \bar{Z}_{T7(1)110kV} \\ &= j116,4323 + 181,5 + j702,9465 + 135,52 + j564,7681 \\ &= 317,02 + j1384,1469 \Omega\end{aligned}$$



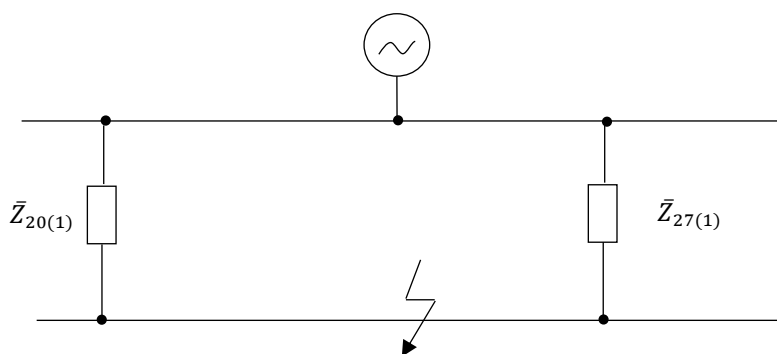
Obr. 24 Následné zjednodušené náhradní schéma zkratového obvodu

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{26,25,V6(1)} &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{25(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{26(1)}}} + \bar{Z}_{V6(1)} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{181,5 + j4160,0893} + \frac{1}{317,02 + j1384,1469}} + 5,2325 + j1,6975 \\ &= 194,4362 + j1046,9194 \Omega\end{aligned}$$



Obr. 25 Následné zjednodušené náhradní schéma zkratového obvodu

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{26,25,24,V6,V2(1)} &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{26,25,V6(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{24(1)}}} + \bar{Z}_{V2(1)} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{194,4362 + j1046,9194} + \frac{1}{32,922 + j4984,7355}} + 4,85 + j2,275 \\ &= 138,489 + j871,4559 \Omega\end{aligned}$$



Obr. 26 Konečné náhradní schéma zkratového obvodu

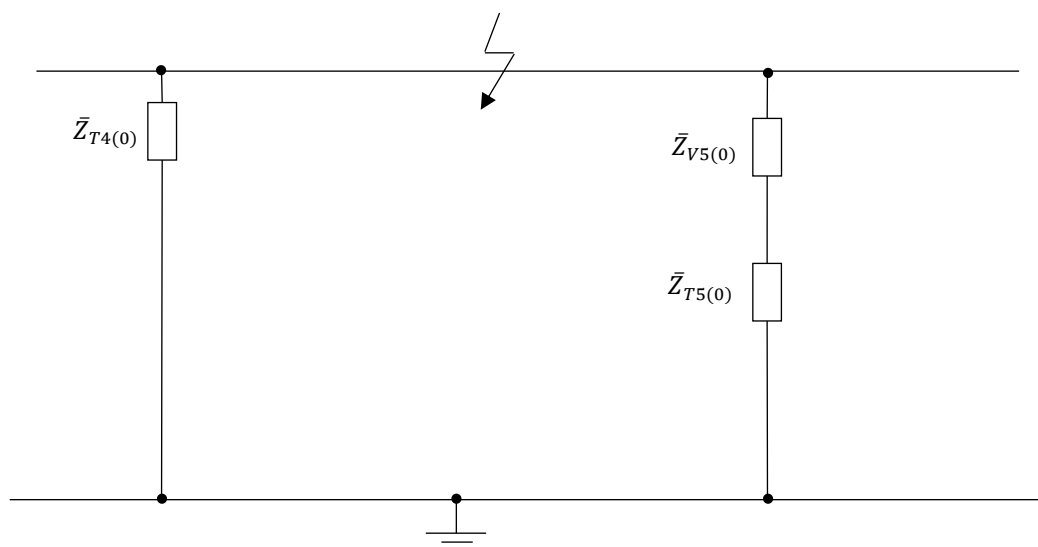
$$\begin{aligned}\bar{Z}_{27(1)} &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{26,25,24,V6,V2(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{23(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{22(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{21(1)}}} + \bar{Z}_{T4(1)} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{138,489 + j871,4559} + \frac{1}{283,1211 + j1221,5794} + \frac{1}{1,3252 + j83,4514} + \frac{1}{4613,125 + j5375,6241} + 2,4105 + j72,5599} \\ &= 5,6773 + j143,9246 \Omega\end{aligned}$$

**Celková impedance zkratového obvodu pro sousledné složky:**

$$\bar{Z}_{(1)} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{27(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{20(1)}}} = \frac{1}{\frac{1}{5,6773 + j143,9246} + \frac{1}{1,1352 + j13,845}} = 0,9883 + j12,632 \Omega$$

$$|\bar{Z}_{(1)}| = \sqrt{Re^2 + Im^2} = \sqrt{0,9883^2 + 12,632^2} = 12,6705 \Omega$$

**Výpočet impedance pro nulové složky:**



*Obr. 27 Náhradní schéma pro nulové složky*

$$\bar{Z}_{T4(0)} = R_{T4(1)} + 0,85 \cdot X_{T4(1)} = 2,4105 + 0,85 \cdot j72,5599 = 2,4105 + j61,6759 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T5(0)} = R_{T5(1)} + 0,85 \cdot X_{T5(1)} = 0,1352 + 0,85 \cdot j6,7209 = 0,1352 + j5,7127 \Omega$$

$$\bar{Z}_{V5(0)} = R_{V5(1)} + 2 \cdot X_{V5(1)} = 1 + 2 \cdot j2,0825 = 1 + j4,165 \Omega$$

**Celková impedance zkratového obvodu pro netočivé složky:**

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{(0)} &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{T4(0)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{V5(0)} + \bar{Z}_{T5(0)}}} = \frac{1}{\frac{1}{2,4105 + j61,6759} + \frac{1}{0,1352 + j5,7127 + 1 + j4,165}} \\ &= 0,889 + j8,5199 \Omega \end{aligned}$$

$$|\bar{Z}_{(0)}| = \sqrt{Re^2 + Im^2} = \sqrt{0,889^2 + 8,5199^2} = 8,5662 \Omega$$

**Třífázový zkratový proud:**

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_{(1)}|} = \frac{1,10 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 12,6705} = 5,513 \text{ kA}$$

**Dvoufázový zkratový proud:**

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot |\bar{Z}_{(1)}|} = \frac{1,10 \cdot 110}{2 \cdot 12,6705} = 4,775 \text{ kA}$$

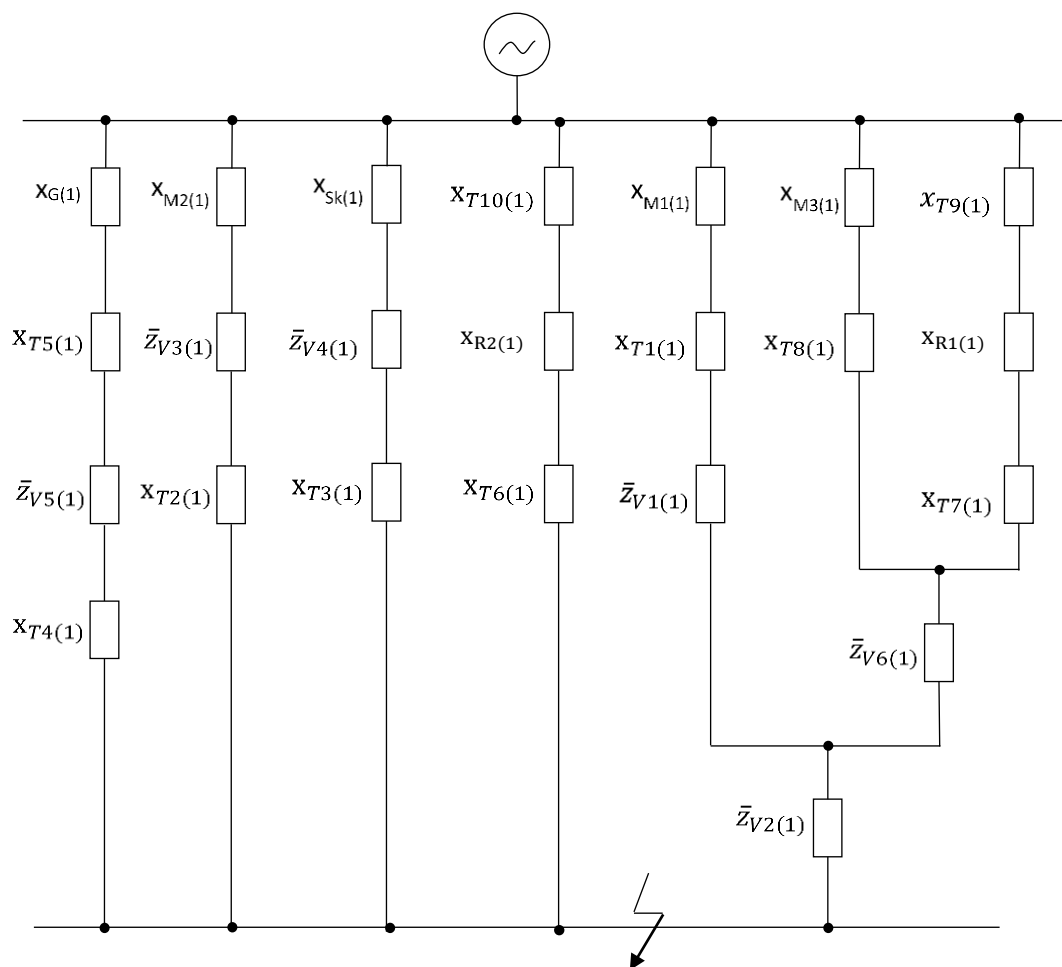
**Jednofázový zkratový proud:**

$$I_{k1}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}{2 \cdot |\bar{Z}_{(1)}| + |\bar{Z}_{(0)}|} = \frac{1,10 \cdot \sqrt{3} \cdot 110}{2 \cdot 12,6705 + 8,5662} = 6,181 \text{ kA}$$

## 6.2. Výpočet počátečního zkratového proudu v bodě 2.

V druhém případě výpočtu zkratu nemůže vzniknout jednofázový zkrat z důvodu neuzemnění na straně vzniku zkratu v napěťové hladině 22 kV. Proto se zde počítá jen dvoufázový počáteční rázový zkratový proud a třífázový počáteční rázový zkratový proud.

### 6.2.1. Výpočet počátečního zkratového proudu v poměrných hodnotách

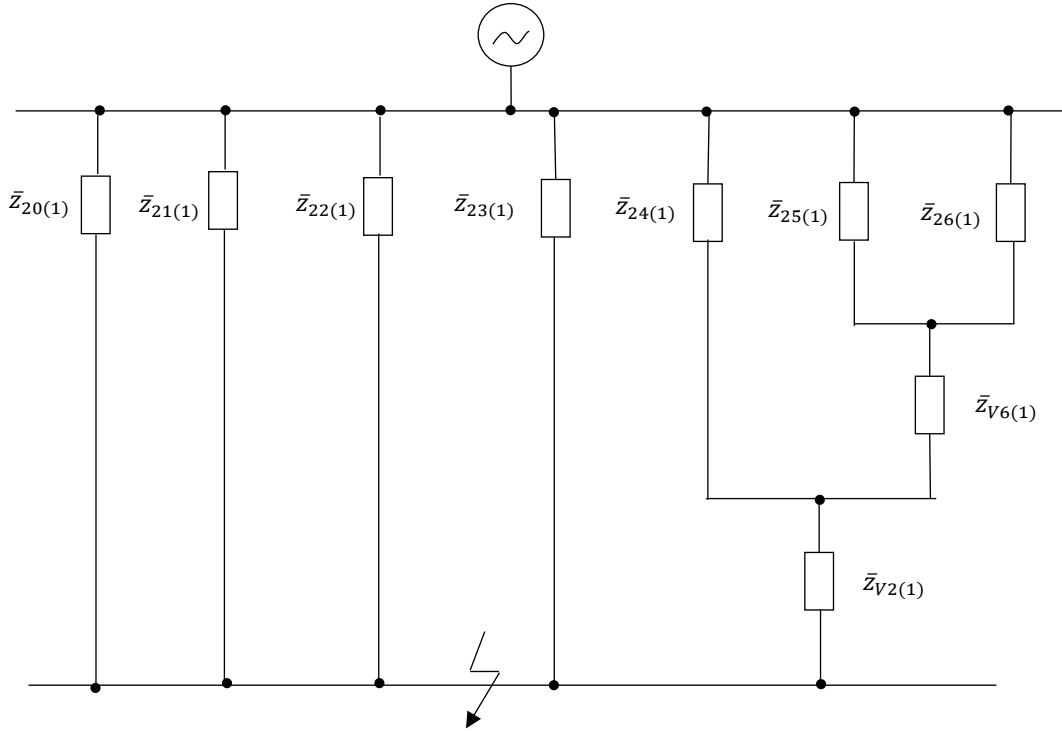


Obr. 28 Náhradní schéma pro sousledné složky v 2. bodě zkratu

#### Hodnoty sousledných reaktancí:

Hodnoty sousledných reaktancí v druhém bodě zkratu mají stejnou hodnotu jako sousledné reaktance v prvním bodě zkratu při výpočtu v poměrných veličinách, a proto se zde není uveden výpočet. Vypočtené hodnoty jsou v Tab. 7, Tab. 8, Tab. 9, Tab. 10 a Tab. 11.

**Výpočet impedance:**



Obr. 29 Zjednodušené náhradní schéma zkratového obvodu pro druhý výpočet zkratu

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{20(1)} &= x_{G(1)} + x_{T5(1)} + \bar{Z}_{V5(1)} + x_{T4(1)} = j0,0833 + j0,1111 + 0,0165 + j0,0344 + j1,2 \\ &= 0,0165 + j1,4288\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{21(1)} &= x_{M2(1)} + \bar{Z}_{V3(1)} + x_{T2(1)} = j57,1428 + 74,6875 + j24,375 + j7,5 \\ &= 74,6875 + j89,0178\end{aligned}$$

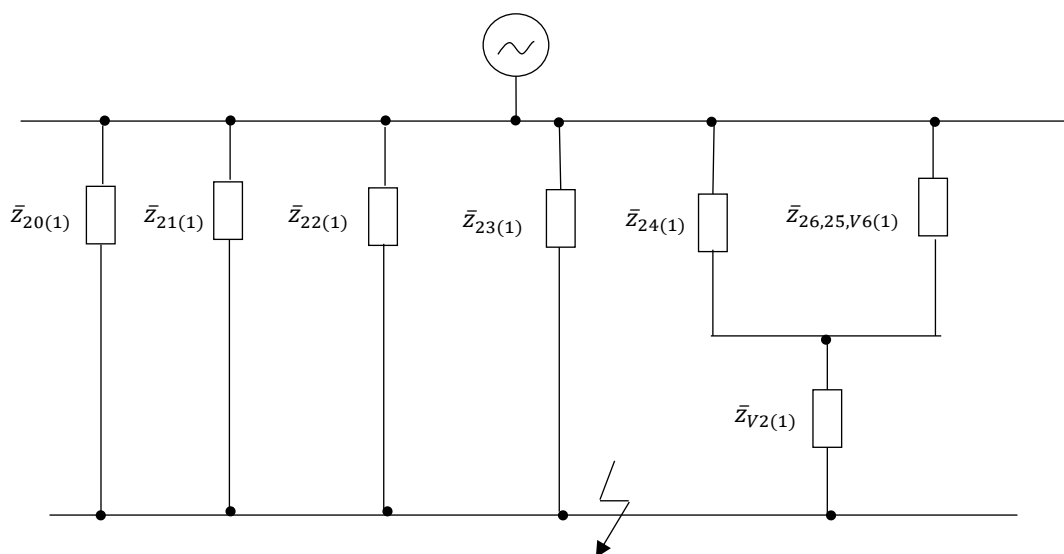
$$\bar{Z}_{22(1)} = x_{Sk(1)} + \bar{Z}_{V4(1)} + x_{T3(1)} = j1,1 + 0,0165 + j0,0344 + j0,245 = 0,0165 + j1,3794$$

$$\bar{Z}_{23(1)} = x_{R2(1)} + x_{T10(1)} + x_{T6(1)} = j1,2651 + j12 + j7,5 = 0 + j20,7651$$

$$\bar{Z}_{24(1)} = x_{M1(1)} + \bar{Z}_{V1(1)} + x_{T1(1)} = j80 + 0,0802 + j0,0376 + j2,4 = 0,0802 + j82,4376$$

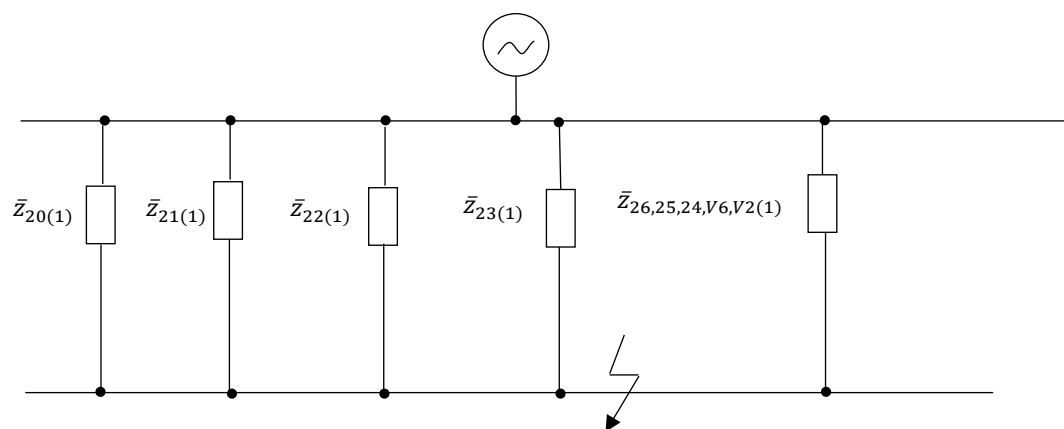
$$\bar{Z}_{25(1)} = x_{M3(1)} + x_{T8(1)} = j57,1428 + j12 = 0 + j69,1428$$

$$\bar{Z}_{26(1)} = x_{R1(1)} + x_{T9(1)} + x_{T7(1)} = j1,9231 + j12 + j9,6 = 0 + j23,5231$$



Obr. 30 Následné zjednodušené náhradní schéma pro druhý výpočet zkratu

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{26,25,V6(1)} &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{25(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{26(1)}}} + \bar{Z}_{V6(1)} = \frac{1}{\frac{1}{j69,1428} + \frac{1}{j23,5231}} + 0,0865 + j0,0281 \\ &= 0,0865 + j17,5798\end{aligned}$$



Obr. 31 Konečné zjednodušené náhradní schéma

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{26,25,24,V6,V2(1)} &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{26,25,V6(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{24(1)}}} + \bar{Z}_{V2(1)} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{0,0865 + j17,5798} + \frac{1}{0,0802 + j82,4376}} + 0,0802 + j0,0376 \\ &= 0,1414 + j14,5275\end{aligned}$$

**Celková impedance zkratového obvodu:**

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{(1)} &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{26,25,24,V6,V2(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{23(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{22(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{21(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{20(1)}}} \\&= \frac{1}{\frac{1}{0,1414 + j14,5275} + \frac{1}{j20,7651} + \frac{1}{0,0165 + j1,3794} + \frac{1}{74,6875 + j89,0178} + \frac{1}{0,0165 + j1,4288}} \\&= 0,0096 + j0,6458\end{aligned}$$

$$|\bar{Z}_{(1)}| = \sqrt{Re^2 + Im^2} = \sqrt{0,0096^2 + 0,6458^2} = 0,646 \Omega$$

**Vztažný proud:**

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 22} = 5,2486 \text{ kA}$$

**Třífázový zkratový proud:**

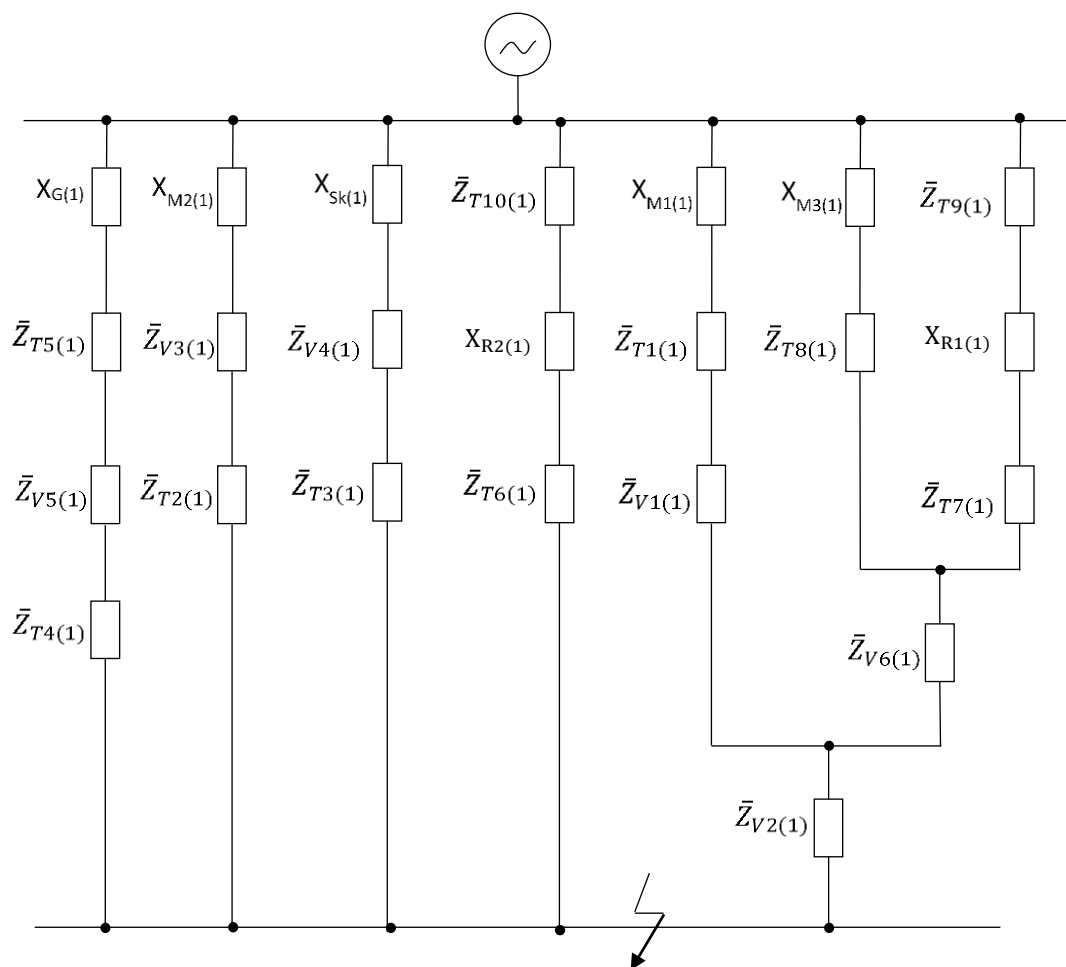
$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot I_v}{|\bar{Z}_{(1)}|} = \frac{1,10 \cdot 5,2486}{0,646} = 8,939 \text{ kA}$$

**Dvoufázový zkratový proud:**

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot I_v}{2 \cdot |\bar{Z}_{(1)}|} = \frac{1,10 \cdot \sqrt{3} \cdot 5,2486}{2 \cdot 0,646} = 7,74 \text{ kA}$$



### 6.2.2. Výpočet počátečního zkratového proudu ve fyzikálních jednotkách



Obr. 32 Náhradní schéma zkratového obvodu ve fyzikálních veličinách

#### **Hodnoty sousledných impedancí a reaktancí přepočtených na napět'ovou hladinu 22 kV:**

Hodnoty sousledných reaktancí bez přepočtu jsou totožné se souslednými parametry bez přepočtu v prvním bodě zkratu. Přepočet na napět'ovou hladinu 22 kV je podobný jako přepočet na napět'ovou hladinu 110 kV, a proto zde budou uvedeny pouze výsledné hodnoty sousledných impedancí a reaktancí.

Tab. 22 Hodnoty sousledných impedancí pro vedení přepočtených na napět'ovou hladinu 22 kV

V	$Z_V (\Omega)$
$Z_{V1(1)22kV}$	0,194+j0,091
$Z_{V2(1)22kV}$	0,194+j0,091
$Z_{V3(1)22kV}$	180,7438+j58,9875
$Z_{V4(1)22kV}$	0,04+j0,0833
$Z_{V5(1)22kV}$	0,04+j0,0833
$Z_{V6(1)22kV}$	0,2093+j0,0679

Tab. 23 Hodnoty sousledných impedancí pro transformátory přepočtených na napěťovou hladinu 22 kV

T	$Z_T (\Omega)$
$Z_{T1(1)22kV}$	1,1229+j5,6984
$Z_{T2(1)22kV}$	3,7812+j17,7517
$Z_{T3(1)22kV}$	0,013+j0,5928
$Z_{T4(1)22kV}$	0,0964+j2,9024
$Z_{T5(1)22kV}$	0,0054+j0,2688
$Z_{T6(1)22kV}$	4,0648+j17,6889
$Z_{T7(1)22kV}$	5,4208+j22,5907
$Z_{T8(1)22kV}$	7,26+j28,1179
$Z_{T9(1)22kV}$	7,26+j28,1179
$Z_{T10(1)22kV}$	7,26+j28,1179

Tab. 24 Hodnoty sousledných reaktancí pro asynchronní motory přepočtených na hladinu 22 kV

M	$X_M (\Omega)$
$X_{M1(1)22kV}$	j193,6
$X_{M2(1)22kV}$	j138,2857
$X_{M3(1)22kV}$	j138,2857

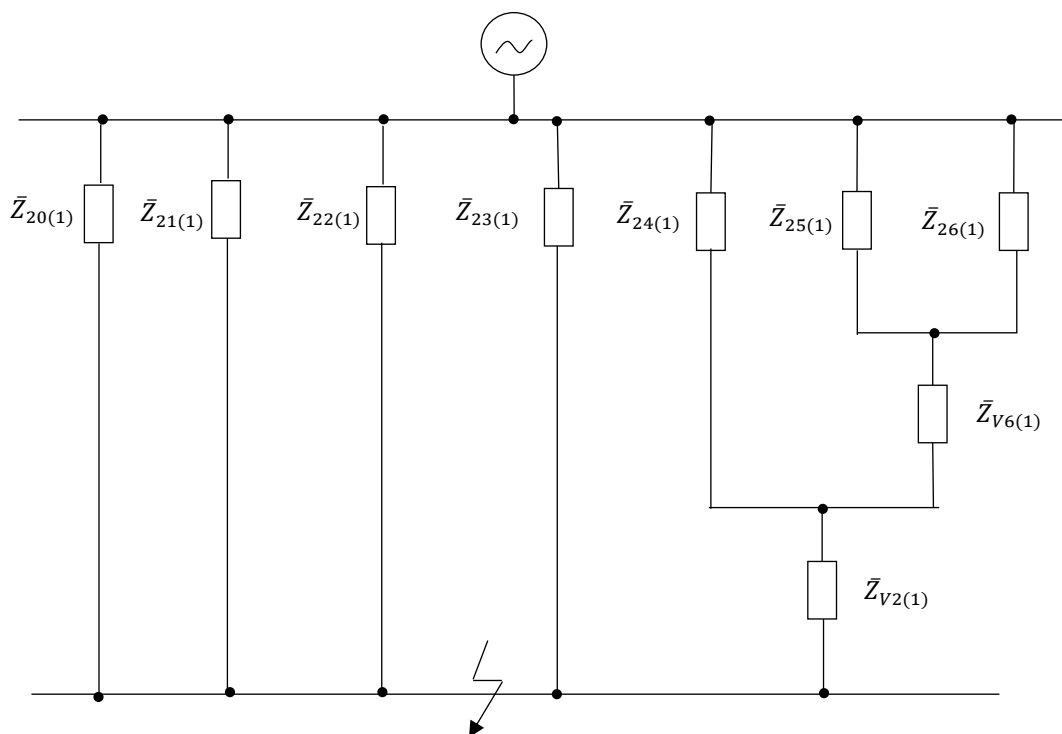
Tab. 25 Hodnoty sousledných reaktancí pro reaktory přepočtených na hladinu 22 kV

R	$X_R (\Omega)$
$X_{R1(1)22kV}$	j4,6573
$X_{R2(1)22kV}$	j3,0563

Tab. 26 Hodnoty sousledných reaktancí pro generátor a soustavu přepočtené na hladinu 22 kV

G a $S_k$	$X_G \text{ a } X_{Sk} (\Omega)$
$X_{G(1)22kV}$	j0,2017
$X_{Sk(1)22kV}$	j2,662

### Výpočet impedance:



Obr. 33 Zjednodušené náhradní schéma

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{20(1)} &= X_{G(1)22kV} + \bar{Z}_{T5(1)22kV} + \bar{Z}_{V5(1)22kV} + \bar{Z}_{T4(1)22kV} \\ &= j0,2017 + 0,0054 + j0,2688 + 0,04 + j0,0833 + 0,0964 + j2,9024 \\ &= 0,1418 + j3,4562 \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{21(1)} &= X_{M2(1)22kV} + \bar{Z}_{V3(1)22kV} + \bar{Z}_{T2(1)22kV} \\ &= j138,2857 + 180,7438 + j58,9875 + 3,7812 + j17,7517 \\ &= 184,525 + j215,0249 \Omega\end{aligned}$$

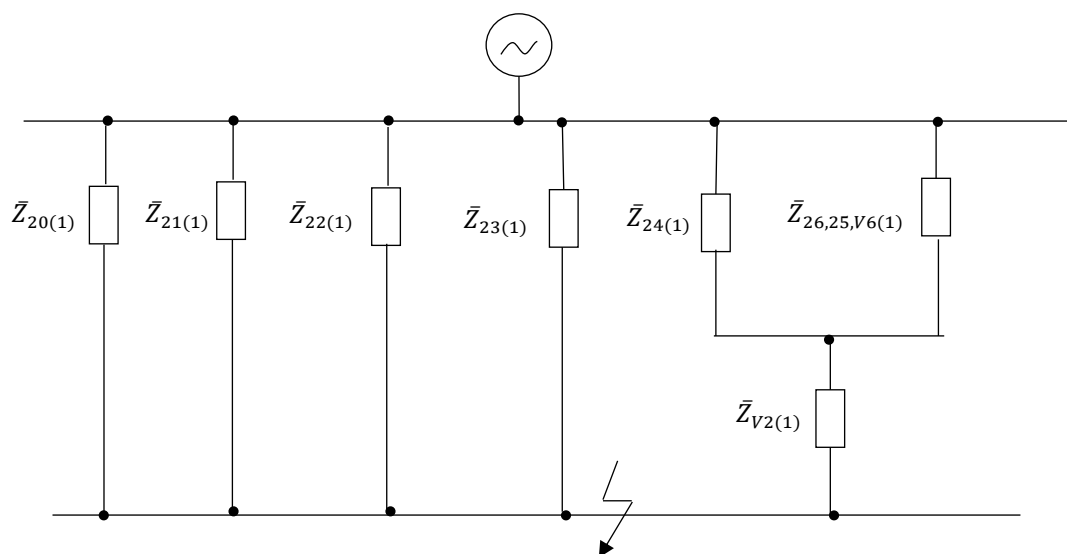
$$\begin{aligned}\bar{Z}_{22(1)} &= X_{Sk(1)22kV} + \bar{Z}_{V4(1)22kV} + \bar{Z}_{T3(1)22kV} = j2,662 + 0,04 + j0,0833 + 0,013 + j0,5928 \\ &= 0,053 + j3,3381 \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{23(1)} &= X_{R2(1)22kV} + \bar{Z}_{T10(1)22kV} + \bar{Z}_{T6(1)22kV} \\ &= j3,0563 + 7,26 + j28,1179 + 4,0648 + j17,6889 = 11,3248 + j48,8631 \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{24(1)} &= X_{M1(1)22kV} + \bar{Z}_{V1(1)22kV} + \bar{Z}_{T1(1)22kV} \\ &= j193,6 + 0,194 + j0,091 + 1,1229 + j5,6984 = 1,3169 + j199,3894 \Omega\end{aligned}$$

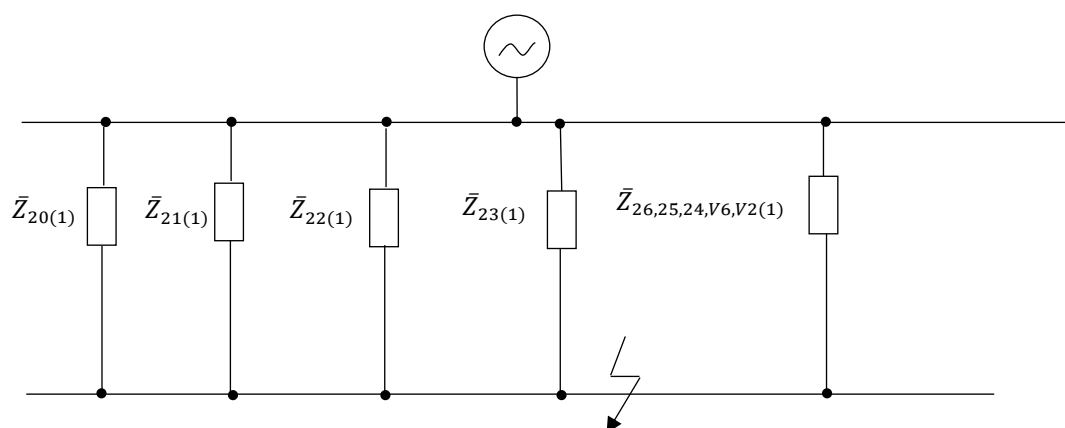
$$\bar{Z}_{25(1)} = X_{M3(1)22kV} + \bar{Z}_{T8(1)22kV} = j138,2857 + 7,26 + j28,1179 = 7,26 + j166,4036 \Omega$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{26(1)} &= X_{R1(1)22kV} + \bar{Z}_{T9(1)22kV} + \bar{Z}_{T7(1)22kV} \\ &= j4,6573 + 7,26 + j28,1179 + 5,4208 + j22,5907 = 12,6808 + j55,3659 \Omega\end{aligned}$$



Obr. 34 Následné zjednodušené schéma zkratového obvodu

$$\begin{aligned}
 \bar{Z}_{26,25,V6(1)} &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{25(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{26(1)}}} + \bar{Z}_{V6(1)} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{7,26 + j166,4036} + \frac{1}{12,6808 + j55,3659}} + 0,2093 + j0,0679 \\
 &= 7,777 + j41,877 \, \Omega
 \end{aligned}$$



Obr. 35 Úplné náhradní schéma zkratového obvodu

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{26,25,24,V6,V2(1)} &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{26,25,V6(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{24(1)}}} + \bar{Z}_{V2(1)} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{7,777 + j41,877} + \frac{1}{1,3169 + j199,3894}} + 0,194 + j0,091 \\ &= 5,5396 + j34,8582 \, \Omega\end{aligned}$$

**Celková impedance zkratového obvodu:**

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{(1)} &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{26,25,24,V6,V2(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{23(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{22(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{21(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{20(1)}}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{5,5396 + j34,8582} + \frac{1}{11,3248 + j48,8631} + \frac{1}{0,053 + j3,3381} + \frac{1}{184,525 + j215,0249} + \frac{1}{0,1418 + j3,4562}} \\ &= 0,0682 + j1,5634 \, \Omega\end{aligned}$$

$$|\bar{Z}_{(1)}| = \sqrt{Re^2 + Im^2} = \sqrt{0,0682^2 + 1,5634^2} = 1,5649 \, \Omega$$

**Třífázový zkratový proud:**

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_{(1)}|} = \frac{1,10 \cdot 22}{\sqrt{3} \cdot 1,5649} = 8,928 \, kA$$

**Dvoufázový zkratový proud:**

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot |\bar{Z}_{(1)}|} = \frac{1,10 \cdot 22}{2 \cdot 1,5649} = 7,732 \, kA$$

**Všechny vypočtené hodnoty celkových impedancí a počátečních zkratových proudů**

*Tab. 27 Vypočtené hodnoty celkových impedancí zkratových obvodů*

V poměrných hodnotách			Ve fyzikálních veličinách		
zkrat	$ \bar{Z}_{(1)}  \, (\Omega)$	$ \bar{Z}_{(0)}  \, (\Omega)$	zkrat	$ \bar{Z}_{(1)}  \, (\Omega)$	$ \bar{Z}_{(0)}  \, (\Omega)$
1.	0,2093	0,1415	1.	12,6705	8,5662
2.	0,649	-	2.	1,5649	-
3.	7,6991	6,375	3.	0,0061	0,0051
4.	0,6853	-	4.	1,6632	-
5.	0,7256	-	5.	1,7629	-
6.	1,47084	-	6.	1,7889	-

*Tab. 28 Hodnoty počátečního zkratového proudu pro všechny body zkratu*

V poměrných hodnotách				Ve fyzikálních veličinách			
zkrat	$I_{k3}''$ (kA)	$I_{k2}''$ (kA)	$I_{k1}''$ (kA)	zkrat	$I_{k3}''$ (kA)	$I_{k2}''$ (kA)	$I_{k1}''$ (kA)
1.	5,516	4,777	6,185	1.	5,513	4,775	6,181
2.	8,939	7,74	nevznikl	2.	8,928	7,732	nevznikl
3.	37,494	32,471	39,775	3.	37,817	32,75	39,918
4.	8,42	7,296	nevznikl	4.	8,4	7,275	nevznikl
5.	7,957	6,891	nevznikl	5.	7,925	6,864	nevznikl
6.	7,851	6,799	nevznikl	6.	7,81	6,764	nevznikl

## 7. Závěr

Tématem této bakalářské práce bylo ukázat problematiku zkratových jevů v elektrických sítích. Jejich teoretický rozbor vzniku zkratu, druhy zkratů, průběhy zkratu a následné možné následky zkratového proudu.

Dále byla popsána metodika výpočtu zkratových proudů podle normy ČSN EN 60909, která nám umožňuje provádět výpočty zkratových proudů a definuje vztahy pro vypočtení zkratových impedancí pro jednotlivé prvky v elektrických sítích.

V praktické části byl proveden výpočet počátečních rázových zkratových proudů v poměrných i fyzikálních jednotkách. Zde byl uveden podrobný postup výpočtu včetně náhradních schémat pro první dva body zkratu ze zadání, které je na obrázku 14 a v tabulce 22 jsou sepsány všechny vypočtené hodnoty pro jedno, dvou i třífázové počáteční rázové zkratové proudy. Lze vidět, že hodnoty počátečních rázových zkratových proudů nevychází totožně ale jsou zde menší rozdíly způsobené častým zaokrouhlováním.

Ze zjištěných výsledků lze usuzovat, že v případě vzniku jednofázového zkratu má tento zkrat nejvyšší hodnotu počátečního rázového zkratového proudu a představuje značné nebezpečí. Vypočtené hodnoty pro trojfázové počáteční rázové zkratové proudy nedosahují tak velkých hodnot jako jednofázové počáteční rázové zkratové proudy, přesto se jedná o nejvíc nebezpečné zkratové proudy, které byly vypočteny pro všechny případy vzniku zkratu. Hodnoty dvoufázového počátečního rázového zkratového proudu dosahují nejmenších hodnot ale stejně jako u třífázového zkratu, byly tyto hodnoty počítány pro všechny případy vzniku zkratu.

## **Seznam použité literatury:**

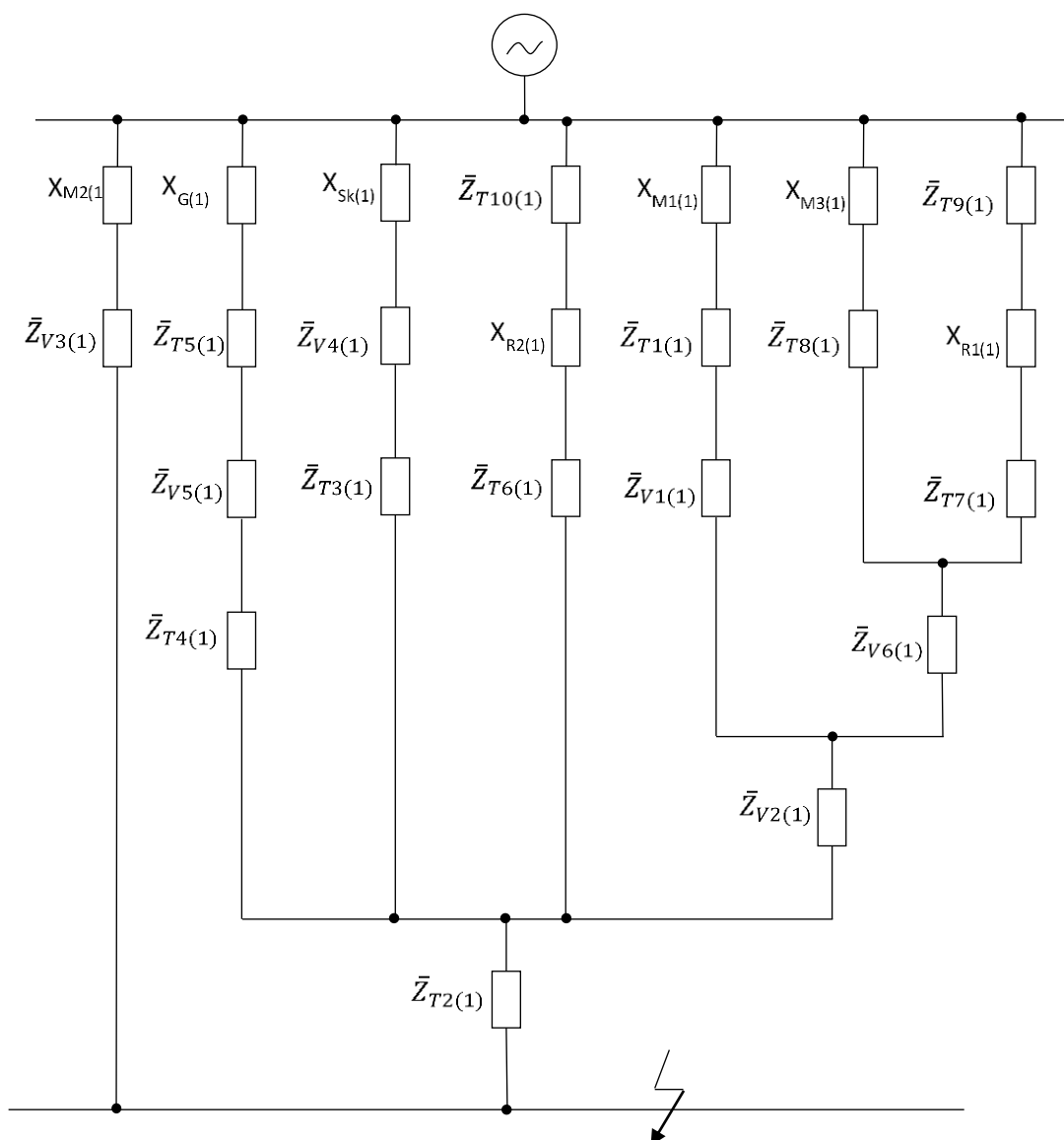
- [1] Pauza, J.: Zkraty v elektrických rozvodech. SNTL Praha 1970
- [2] ČSN EN 60909-0.: Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách.
- [3] Hradílek, Z.: Elektroenergetika II. Ostrava 1993
- [4] Trojánek, Z.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách. SNTL, Praha 1987
- [5] Krejčí.P.: Cvičení z elektroenergetiky. Ostrava 2003



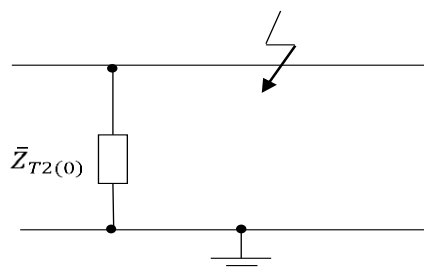
## Seznam příloh

Příloha A: Náhradní schéma zkratového obvodu pro sousledné a nulové složky v bodě 3. ....	I
Příloha B: Náhradní schéma zkratového obvodu pro sousledné složky v bodě 4. ....	II
Příloha C: Náhradní schéma zkratového obvodu pro sousledné složky v bodě 5. ....	III
Příloha D: Náhradní schéma zkratového obvodu pro sousledné složky v bodě 6. ....	IV

Příloha A: Náhradní schéma zkratového obvodu pro sousledné a nulové složky v bodě 3.

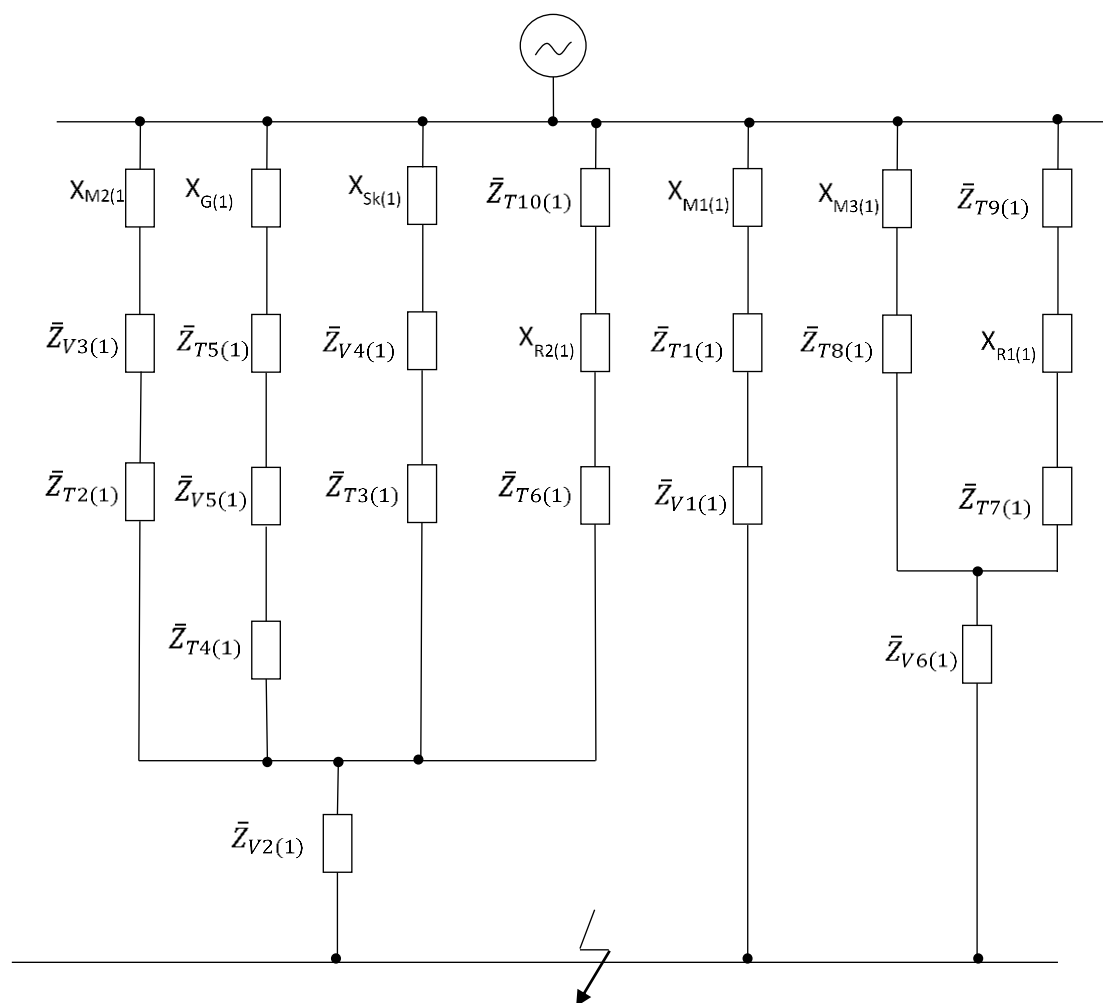


Obrázek A.1: Náhradní schéma zkratového obvodu pro sousledné složky v bodě 3.

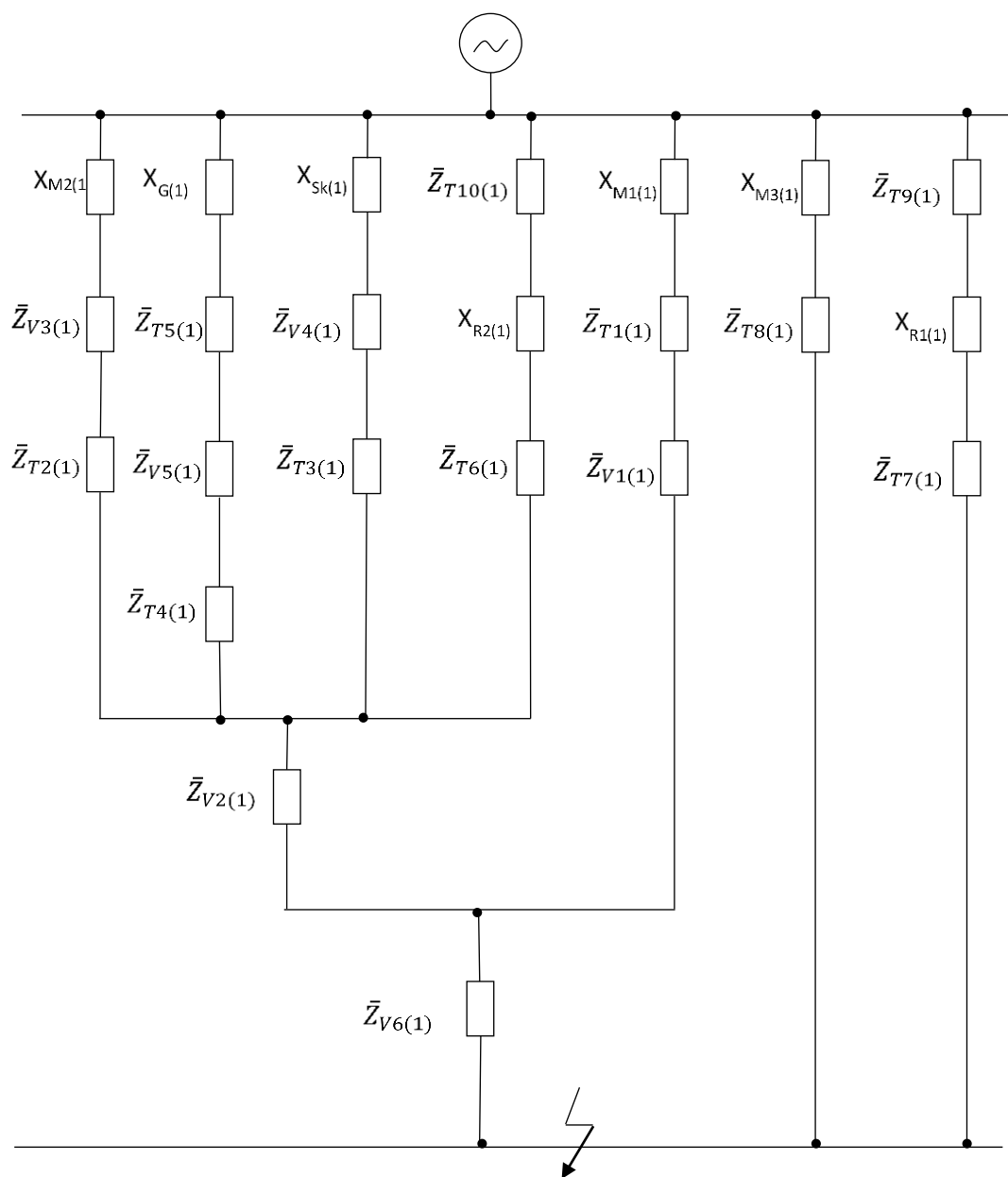


Obrázek A.2: Náhradní schéma zkratového obvodu pro nulové složky v bodě 3.

Příloha B: Náhradní schéma zkratového obvodu pro sousledné složky v bodě 4.



Příloha C: Náhradní schéma zkratového obvodu pro sousledné složky v bodě 5.



Příloha D: Náhradní schéma zkratového obvodu pro sousledné složky v bodě 6.

